

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

Modélisation des charges d'essieu

Modelisierung des Axlasten

Modelling of axle loads

UNTERHALT 2000

Projet 3: Durabilité des enrobés

Partie 1: Charges d'essieu

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)

Dr J. Perret, ing. dipl. EPF
Prof. A.-G. Dumont

Mandat de recherche ASTRA 2000/421-1

Septembre 2004

PREAMBULE

Le projet Unterhalt 2000 s'inscrit dans les mesures préconisées par un groupe de travail de l'OFROU visant à améliorer la situation des travaux d'entretien sur les routes à fort trafic. Il vient en appui et coordination avec les projets COST 343 et 345 qui ont élaboré en Europe un état des connaissances sur ce thème.

Pour la première fois en Suisse les trois laboratoires "fédéraux" spécialisés dans la technique des revêtements routiers (EPFL-LAVOC, ETHZ-IGT et EMPA-113) se sont groupés pour mener un projet de grande ampleur et ceci en association avec les spécialistes privés des sociétés Viagroup SA et IMP-Bautest.

Le projet global est décomposé en 5 projets ou paquets de recherche liés entre eux (FP1, FP2, FP3, FP4 et FP7) dont quatre (FP1 à FP4) sont réalisés sous la coordination du Prof. A.-G. Dumont.

Les résultats ont abouti à une meilleure compréhension des phénomènes de dégradation des chaussées et à des propositions d'amélioration pour optimiser la durée de vie des revêtements bitumineux.

VORWORT

Das Forschungsprojekt Unterhalt 2000 stellt die konkrete Umsetzung einer von mehreren Massnahmen die von einer Arbeitsgruppe des Bundesamtes für Strassen ASTRA vorgeschlagen wurden, um die Erhaltungstätigkeit auf hoch belasteten Strassen effizienter zu gestalten. Das Forschungsprojekt wurde in Ergänzung und in Koordination der COST-Projekte 343 und 345, welche den Stand der Kenntnisse in diesem Bereich auf europäischem Niveau aufgearbeitet haben.

Bei diesem Projekt haben sich erstmalig in der Schweiz die drei "eidgenössischen" Labors, die auf dem Fachgebiet der Strassenbautechnik spezialisiert sind, mit Fachleuten aus der Privatwirtschaft der Firmen Viagroup SA und IMP-Bautest zusammengruppiert, um ein Grossprojekt durchführen zu können.

Das Gesamtprojekt umfasst 5 miteinander verbundene Einzelprojekte oder Forschungspakete (FP1, FP2, FP3, FP4 und FP7) deren vier (FP1 bis FP4) unter der Gesamtkoordination von Prof. A.-G. Dumont realisiert worden sind.

Die Ergebnisse haben zu einem verbesserten Verständnis der Schadensbildungsmechanismen von Fahrbahnen geführt und zu Verbesserungsvorschlägen, um eine optimale Dauerhaftigkeit der bituminösen Beläge zu erreichen.

COMMISSION D'ACCOMPAGNEMENT

Président: Dr. J.P. Junker, ing. dipl. EPF/SIA

D. Baer, ing. dipl. ETS

J.J. Maeder, ing. dipl. EPF

M. Fontana, ing. dipl. EPF

A. Nellen, ing. dipl. EPF

J. Frei, ing. dipl. ETS

Prof. Dr. K. Schellenberg

B. Graf, ing. dipl. EPF

M. Seeberger, ing. dipl. EPF

RESUME

La configuration d'un essieu d'un poids lourd influence de façon directe le transfert de charge pneu/chaussée. L'objectif de cette étude est de quantifier et qualifier l'influence respective des trois principaux paramètres d'un essieu: intensité de charge, pression de gonflage et type de roue.

L'étude se base sur une approche empirique, par des essais en vraie grandeur, et une approche analytique, par la modélisation du comportement mécanique de la structure. La comparaison de ces différentes mesures permettra d'une part d'évaluer la modélisation vis-à-vis de la réalité et d'autre part de déterminer l'influence de chaque paramètre sur la répartition et l'intensité des déformations dans les couches bitumineuses et ceci aussi à faible profondeur.

Par ailleurs une analyse de l'évolution des contraintes principales en fonction de la profondeur servira à mieux expliquer le développement des ornières dans les matériaux bitumineux.

Cette étude permettra également de souligner l'importance de l'utilisation de méthodes analytiques pouvant intégrer les caractéristiques détaillées des charges pour en déduire l'état de sollicitation à faible profondeur et sous le bord du pneu.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ausgestaltung der Achse eines Schwerverkehrfahrzeugs hat einen direkten Einfluss auf die Lastverteilung zwischen Reifen und Strasse. Ziel der vorliegenden Studie ist die Beurteilung der drei wichtigsten Einflussparameter: Gesamtlast, Reifendruck und Reifentyp.

Die Studie basiert einerseits auf einem empirischen Ansatz, mittels Grossversuchen, und andererseits einem analytischen Ansatz, mittels eines mechanischen Verhaltensmodells des Schichtaufbaus. Analyse und Vergleich der Messungen erlaubt einerseits die Beurteilung des Modells anhand des Grossversuches, sowie andererseits die Bewertung des Einflusses der verschiedenen Parameter auf Verteilung und Stärke der Verformungen in bituminösen Schichten, dies auch in geringer Tiefe.

Zusätzlich kann die Analyse der Spannungsentwicklung in Abhängigkeit der Tiefe mithelfen, die Entstehung von Spurrinnen in bituminösen Schichten zu erklären.

Schlussendlich soll diese Studie auch die Wichtigkeit der Benutzung von analytischen Methoden unterstreichen, welche aus detaillierten Lastmerkmalen den Spannungszustand in geringer Tiefe und unter dem Reifenrand herleiten.

SUMMARY

The axle configuration of a heavy vehicle has a direct impact on the load distribution on the pavement. This study evaluates the relative influence of the three most important parameters: the total load intensity, the inflation pressure as well as the tyre type.

The study is based on an empirical approach using large-scale accelerated loading tests and an analytic approach using a mechanical behaviour model of the multi-layer

structure. Comparing these two approaches allows evaluating the model in respect to reality and specifying the influence of each parameter on the distribution and intensity of stresses and strains in the bituminous layers, even just below the surface.

Also, the stress and strain analysis in respect to the depth helps to explain rut development in bituminous materials.

Finally, this study underlines the importance of using an analytical approach considering detailed load characteristics in order to deduce the stress state at low depth and right under the tyre's edge.

Table des matières

1. Introduction	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectif de l'étude.....	1
1.3 Démarche de l'étude.....	2
2. Sollicitations et dimensionnement des chaussées routières	3
2.1 Les différentes sollicitations	3
2.2 Les différents types de méthodes de dimensionnement	4
2.2.1 Méthode empirique : exemple de la méthode suisse.....	4
2.2.2 Méthode mécanique empirique.....	5
2.2.3 Méthode incrémentale	7
2.3 Problématique des charges de trafic	8
2.3.1 Lois de puissance pour le trafic équivalent.....	8
2.3.2 Conditions réelles d'application des charges de trafic	12
2.3.3 Le trafic pour le dimensionnement empirique : exemple des normes suisses..	20
2.3.4 Le trafic dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement.....	21
2.4 Outils pour la modélisation des superstructures routières	22
2.4.1 Le modèle multicouche de Burmister.....	22
2.4.2 La charge dans le modèle de Burmister	23
3. Déformations des couches bitumineuses	24
3.1 Mesures de déformations sur des structures en vraie grandeur	24
3.1.1 Description des structures	25
3.1.2 Instrumentation et mesures	26
3.2 Signaux de déformations expérimentaux dans les couches bitumineuses.....	26
3.2.1 Déformations horizontales au bas de la couche de base	27
3.2.2 Déformations horizontales au bas de la couche de roulement.....	28
3.3 Modélisation élastique linéaire des structures de la halle-fosse	29
3.4 Matériaux mis en place à la halle-fosse et propriétés élastiques.....	30
3.4.1 Enrobés bitumineux des couches de base et de roulement	30
3.4.2 Matériaux de la couche de fondation	31
3.4.3 Matériaux du sol de fondation et fond de la fosse	31
3.4.4 Propriétés élastiques des matériaux.....	32
3.5 Amplitudes maximales des déformations au bas de la couche de base	32
3.5.1 Tous cas de charge et de température confondus	33

3.5.2	Effet de la variation de l'intensité de la charge	34
3.5.3	Effet de la variation de la pression de gonflage	37
3.5.4	Effet du type roues.....	39
3.5.5	Evaluation statistique de l'influence des paramètres de charge	41
3.5.6	Synthèse des résultats pour les amplitudes des déformations longitudinales..	45
3.6	Signaux de déformation au bas de la couche de base.....	47
3.6.1	Effets des conditions de chargement sur les résultats expérimentaux	47
3.6.2	Comparaison entre signaux expérimentaux et modélisés	51
3.7	Signaux de déformation au bas de la couche de roulement.....	54
3.7.1	Effets des conditions de chargement sur les résultats expérimentaux	54
3.7.2	Comparaison entre signaux expérimentaux et modélisés	60
3.7.3	Mise en évidence et description des « irrégularités »	62
3.7.4	Explication théorique et physique des « irrégularités »	63
3.8	Synthèse.....	67
4.	Exploitation des résultats pour le calcul du trafic équivalent.....	68
4.1	Démarche	68
4.2	Intensité de la charge	68
4.3	Pression de gonflage	70
4.4	Type de roues	72
5.	Effets de la définition des conditions de charge.....	73
5.1	Contenu et démarche	73
5.2	Hypothèses de modélisation	74
5.2.1	Genre d'éléments finis	74
5.2.2	Maillage	74
5.2.3	Conditions aux limites	75
5.2.4	Conditions de charge	75
5.3	Evaluation au bas de la couche de base	77
5.4	Evaluation en haut des couches bitumineuses	78
5.5	Variation des sollicitations en fonction de la profondeur	80
5.6	Synthèse.....	84
6.	Conclusions et recommandations.....	85
7.	Bibliographie	87
8.	Annexes	90
8.1	Equations des contraintes et déplacements du système de Burmister.....	90
8.2	Essais de module en laboratoire pour les matériaux bitumineux	92

1.Introduction

1.1 Problématique

Les poids lourds, qui représentent les éléments les plus agressifs du trafic en terme de sollicitations, voient leur configuration évoluer rapidement et constamment. En plus d'une tendance à voir la charge totale maximale admissible augmenter, on constate également que la configuration des essieux¹ et des roues change. La tendance observée, en particulier sur les semi-remorques, est de remplacer les roues jumelées traditionnelles par des essieux à roues simples à large bande. De plus, le diamètre des pneus tend à diminuer, ce qui nécessite un accroissement de leur pression de gonflage. Ces évolutions ont pour conséquence de modifier de façon importante, le transfert de charge en surface de la chaussée. Des dégradations observées sur des revêtements, qui jusqu'alors ne posaient aucun problème, sont là pour le confirmer.

Les récentes études entreprises dans ce domaine montrent que la répartition de la charge au contact pneu-chaussée n'est pas uniforme. Or à ce jour, les modèles de dimensionnement font généralement appel à une modélisation de la charge basée sur l'hypothèse d'une répartition uniforme de la pression de contact sur une surface circulaire. De plus, les critères de dimensionnement utilisés ne concernent jamais directement l'état de sollicitation (contraintes ou déformations) à faible profondeur, alors que c'est à cet endroit qu'il faut s'attendre à ce que les modifications dans l'application des charges aient des influences marquées.

Si l'on veut mettre au point des matériaux capables de performances accrues, il convient de déterminer tout d'abord précisément les sollicitations générées par les charges de poids lourds dans le revêtement à travers un modèle de calcul d'une part, et de mettre au point des essais qui traduisent les performances des matériaux vis-à-vis de ces sollicitations d'autre part. En outre, il est nécessaire de pouvoir différencier les sollicitations subies par les matériaux bitumineux en fonction de leur position dans la chaussée (profondeur).

Les nombreux paramètres pouvant avoir une incidence sur la répartition des pressions au contact pneu-chaussée sont multiples. La forme du pneu, sa pression de gonflage et sa rigidité, la charge appliquée, la température du lieu, la vitesse et la trajectoire des véhicules lourds, la planéité de la chaussée, la suspension du véhicule, sont des éléments qui exercent chacun une influence significative sur les pressions de contact.

1.2 Objectif de l'étude

La présente recherche, vise à proposer une nouvelle approche pour la modélisation des charges de trafic. Elle définit par ailleurs les paramètres entrant dans la

¹ On utilise, par abus de langage, le terme "essieu" pour désigner un "axe". Un essieu est parfois constitué de plusieurs axes (tandem, tridem)

description des charges de trafic qui influencent de façon significative les sollicitations des couches bitumineuses des chaussées routières. Elle suggère également des méthodes permettant d'intégrer la prise en compte de ces paramètres dans le calcul des charges de trafic.

1.3 Démarche de l'étude

Après un premier chapitre d'introduction, le deuxième chapitre de cette étude est consacré à la problématique du dimensionnement des chaussées. Il commence par une brève présentation de deux types de méthodes de dimensionnement : les méthodes purement empiriques et les méthodes dites mécaniques empiriques. Il se poursuit par un état des connaissances concernant la prise en compte des charges dans les méthodes de dimensionnement et les conditions réelles d'application des charges sur les chaussées. Ce chapitre se termine par une brève description des outils analytiques permettant le calcul des sollicitations dans les chaussées.

Le chapitre trois est consacré à l'analyse des déformations dans les couches bitumineuses, analyse basée aussi bien sur des données expérimentales que sur les résultats de modélisations effectuées selon les principes des méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement. Le chapitre commence par une description des expériences ayant fourni les résultats expérimentaux, par des considérations sur l'analyse des signaux de déformation enregistrés dans les couches bitumineuses des chaussées souples et par une définition des hypothèses retenues pour les modélisations. La suite du chapitre est consacrée aux résultats obtenus, soit à :

- une étude des amplitudes maximales de déformation au bas des couches bitumineuses pour différentes conditions de chargement (cette étude permet notamment de définir l'influence relative des paramètres de charge - intensité, pression de gonflage, type de roue - sur les amplitudes maximales)
- une étude des signaux de déformation au bas des couches bitumineuses
- une étude des signaux de déformation à faible profondeur, soit au bas de la couche de roulement.

Le quatrième chapitre émet des propositions pour exploiter les résultats obtenus au chapitre trois. Ces propositions consistent en des formules permettant d'intégrer les principaux facteurs décrivant les charges de trafic – intensité de la charge, pression de gonflage et type de roue - dans le calcul du trafic équivalent.

Le cinquième chapitre étudie l'effet des variations des conditions d'application des charges sur les contraintes et les déformations calculées à partir d'un comportement élastique. Il consiste à appliquer différentes hypothèses pour la répartition des pressions de contact exercée par le pneu sur la chaussée, ceci pour un même chargement en termes d'intensité de la charge et de pression de gonflage des pneus. Les effets sont étudiés à deux profondeurs, soit au bas de la couche de base et en surface. Le chapitre se termine par des considérations sur les variations des sollicitations agissant sur les matériaux bitumineux en fonction de la profondeur où ils se trouvent dans la chaussée.

2. Sollicitations et dimensionnement des chaussées routières

2.1 Les différentes sollicitations

Les dégradations des structures routières peuvent être associées à trois types de sollicitations qui peuvent avoir des origines différentes:

- sollicitations d'origine mécanique
- sollicitations d'origine climatique
- phénomènes d'altération chimique

Les processus de dégradations sont en général le résultat de la combinaison de ces trois types de sollicitation, si bien qu'il conviendrait d'envisager le comportement des structures routières sous leur effet simultané. Toutefois, il n'existe pas actuellement de méthode d'analyse complète permettant de combiner l'ensemble de ces différents effets, raison pour laquelle les approches théoriques visant à décrire le comportement des structures routières tendent généralement à les séparer pour se focaliser principalement sur un nombre restreint de ces aspects, adoptant des hypothèses simplificatrices pour les autres.

Lorsque l'on parle de sollicitations mécaniques, on pense en premier lieu à celles qui sont induites par le trafic circulant sur les infrastructures et qui constituent l'objet principal de cette étude. Cependant, il faut signaler que des sollicitations mécaniques peuvent avoir d'autres origines, notamment en rapport avec les conditions climatiques ou hydrogéologiques.

Le trafic peut être divisé en deux catégories: le trafic léger et le trafic lourd. Cette distinction se fait en général à partir de considérations légales ou techniques et par une limite de la charge totale des véhicules. En Suisse, le trafic lourd selon la norme « Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent » (SN 640320) se compose de l'ensemble des véhicules dont le poids total excède 3,5 to. Le trafic lourd est donc essentiellement composé de camions et de bus, dont les silhouettes (nombre et type d'essieux) sont extrêmement variables. En raison de l'effet quasi insignifiant du trafic léger, seul le trafic lourd est pris en compte pour le dimensionnement des structures routières².

² Comme ordre de grandeur, on admet que le passage d'un seul camion correspond aux passages d'environ 10'000 voitures

2.2 Les différents types de méthodes de dimensionnement

Ce chapitre contient la description et les principes de trois différents types de méthodes de dimensionnement :

- méthode empirique
- méthode mécanique empirique (ou analytique empirique)
- méthode incrémentale.

Si les deux premières méthodes sont largement utilisées actuellement, la troisième est en fait une proposition émise par un groupe d'experts européens sur les principes qui devraient être appliqués pour définir une méthode permettant de suivre au mieux l'évolution de l'état réel des chaussées pendant leur utilisation.

2.2.1 Méthode empirique : exemple de la méthode suisse

Les méthodes empiriques de dimensionnement font appel exclusivement à des expériences comparant le comportement à long terme de diverses structures pour différentes conditions climatiques et de trafic. Des essais en vraie grandeur (test de structures réelles sous des conditions réalistes de trafic et de climat) apportent également des informations nécessaires à la mise en place des règles empiriques de dimensionnement. La méthode de dimensionnement définie par les normes routières suisses éditées par la VSS³ est un exemple représentatif des méthodes empiriques.

Cette méthode se base sur les résultats de l'AASHO Road Test⁴ (AASHO 1986) dont les normes suisses sont issues. Durant cet essai, un grand nombre de structures routières de conceptions différentes ont été sollicitées par des véhicules présentant différentes configurations de charge (intensité et nombre d'axes par essieu). L'exploitation des résultats a essentiellement été faite en terme d'équivalence, tant en ce qui concerne les charges de trafic par la notion de trafic équivalent, que les matériaux des chaussées, par la notion de valeurs de portance (a). Ces dernières, combinées avec les épaisseurs des couches, servent à quantifier la capacité portante d'une chaussée par sa valeur SN (Structural Number)⁵.

Le dimensionnement des chaussées routières en Suisse est défini par la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN 640324). Il nécessite que les deux données fondamentales définies précédemment (trafic et sol) soient définies par des classes de trafic et des classes de portance du sol d'infrastructure.

Les classes de trafic pondéral T_i sont définies à partir du trafic pondéral équivalent calculé selon la norme « Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent » (SN 640320). Les classes de trafic sont au nombre de 6, allant de T1 pour un trafic très léger à T6 pour un trafic extrêmement lourd. Des explications plus détaillées pour le calcul du trafic équivalent sont données ultérieurement (cf. § 2.3.1 et 2.3.3).

³ Association suisse des professionnels de la route et des transports

⁴ Essai en vraie grandeur sur piste d'essai réalisé aux Etats-Unis de 1958 à 1960, AASHO : American Association of State Highway Officials

⁵ On distinguera la notation SN pour Structural Number de celle de SN Schweizer Norm

Les classes de portance sont au nombre de 5, allant de S0 pour une portance très faible à S4 pour une portance très élevée. Les sols de classe S0 n'entrent pas dans le dimensionnement traditionnel des chaussées : ils doivent être améliorés ou faire l'objet d'une étude particulière. Les classes de portance sont définies dans la norme « Sols, essais - essai de plaque M_E et E_v » (SN 670317) et la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN 640324) à partir d'un des paramètres suivants :

- module M_{E1} (en kN/m^2) selon (SN 670317)
- module E_{v1} (en kN/m^2) selon (SN 670317)
- coefficient CBR (en %) selon (SN 670316) et (SN 670320)
- module de réaction de Westergaard (en MN/m^3) selon (SN 670319).

Pour le dimensionnement des chaussées souples et semi-rigides, la norme fixe une valeur SN nécessaire pour des classes de trafic et de portance définies. La valeur SN effective d'une superstructure se calcule de la manière suivante :

$SN = \sum_i^n a_i \cdot D_i$	Eq. 1
-------------------------------	-------

avec :

- a_i = valeur de la portance équivalente d'un cm d'un matériau i par rapport à la valeur d'une grave ronde, prise comme matériaux de référence (-)
- D_i = épaisseur de la couche du matériau i dans la superstructure (cm)

Un catalogue des structures a été établi sur ce principe et est proposé dans la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN 640324).

2.2.2 Méthode mécanique empirique

Ces méthodes font appel à une approche analytique qui est complétée par des données empiriques. Décrites dans le rapport final de l'action COST 333 intitulée « Development of New Bituminous Pavement Design Method » (COST_333 1999) ou dans « Pavement Analysis and Design » (Huang 1993), elles procèdent généralement en deux étapes :

- détermination des sollicitations dans une superstructure sous l'effet d'une charge définie de trafic
- mise en relation de ces sollicitations avec les dégradations des chaussées.

En plus du modèle pour la charge de référence, ces méthodes utilisent deux types de modèles pour les matériaux auxquels elles ont recours : des modèles de calcul (ou de réponses) et des modèles dits de performances (Figure 1).

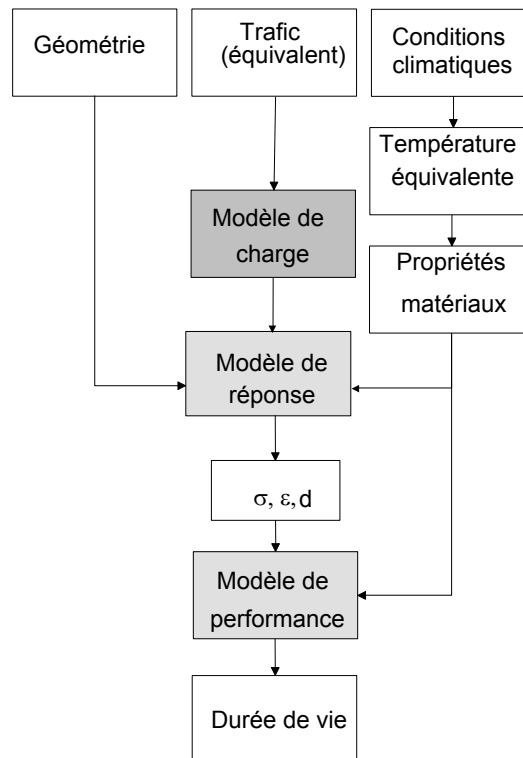


Figure 1 : Principe de fonctionnement des méthodes de dimensionnement mécaniques empiriques (COST_333 1999)

Le modèle de charge, qui est au centre de ce travail, consiste à donner une image aussi réaliste que possible des charges de trafic appliquées par les roues des véhicules lourds.

Les modèles de réponse permettent d'obtenir la réponse immédiate d'une chaussée, en termes de contraintes et déformations, sous l'effet d'une charge et dans des conditions bien définies. Ils nécessitent la définition de paramètres pour décrire la structure (géométrie et lois de comportement) et les conditions de chargement (intensité de la charge, pression de contact, etc.). Ils fournissent des résultats théoriques correspondant aux hypothèses retenues pour la modélisation. Dans la plupart des cas, ces modèles se basent sur un comportement élastique des matériaux, mais rien ne s'oppose à l'utilisation d'autres types de comportement.

Les modèles de performance relient les états de sollicitations issus des modèles de réponse avec les dégradations des chaussées. Ils sont généralement obtenus en combinant des résultats d'essais en laboratoire avec l'observation du comportement réel de chaussées. Ils permettent d'exprimer le nombre de cycles d'une sollicitation donnée qu'une chaussée est à même de supporter avant de présenter une dégradation jugée inadmissible.

Ces deux types de modèles dépendent d'un même et unique phénomène : le comportement des matériaux bitumineux, et ne sont en principe pas indépendants. L'existence d'une séparation de ceux-ci dans les méthodes de dimensionnement provient généralement de la prise en compte de données empiriques dans les modèles de performance.

Etant donné que les normes routières suisses ne proposent pas de méthodes mécaniques empiriques, les hypothèses retenues pour cette étude seront tirées de la méthode française de dimensionnement des chaussées décrite dans le guide

technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » (SETRA-LCPC 1994).

2.2.3 Méthode incrémentale

Au niveau européen, un projet de fonctionnement pour une méthode incrémentale a été proposé (Figure 2).

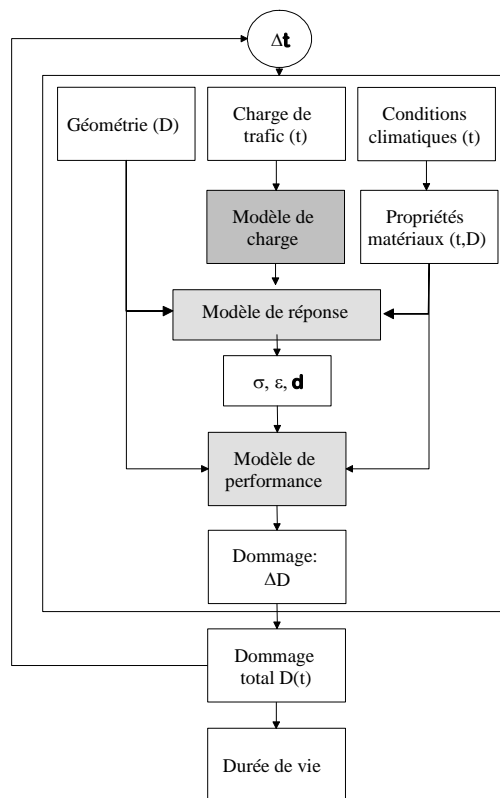


Figure 2 : Schéma de fonctionnement pour une méthode incrémentale de dimensionnement (COST_333 1999)

Cette méthode envisage d'étudier l'évolution d'une chaussée dans le temps (t) en cumulant l'effet, exprimé en terme de dommage (D), de chacune des sollicitations induites par les charges de trafic. Une telle méthode doit permettre de limiter, voir de supprimer, l'importance des données empiriques pour le dimensionnement des chaussées routières. Cette démarche prévoit de tenir compte de l'effet d'une sollicitation non seulement sur l'état de la chaussée (géométrie), mais également sur l'évolution des propriétés des matériaux en fonction du dommage subi. Elle doit également intégrer l'effet des variations de température et les données réelles de trafic, sans avoir recours à la notion de trafic équivalent. La mise en place d'une telle méthode s'avère cependant très complexe à cause des nombreuses interactions entre les phénomènes pris en compte. Ainsi, pour chaque nouvelle charge de trafic agissant à l'instant t_i , il s'agit de déterminer un supplément de dommage en tenant compte non seulement de l'influence des conditions climatiques sur les propriétés des matériaux à cet instant t_i , mais également des dommages déjà subis par la structure.

L'intérêt d'une telle méthode réside dans la possibilité de suivre l'évolution d'une chaussée au cours du temps : outre une estimation de sa durée de vie, il serait possible d'évaluer son état structural à tout instant. Cette évaluation permettrait

d'introduire la notion de cycle de vie d'une structure routière pour des analyses économiques prenant en compte les investissements, les coûts d'exploitation et les coûts d'entretien.

Toutefois, une telle démarche nécessite un nombre très important de données (trafic, climat, lien entre les deux, etc.) qui sont actuellement difficilement disponibles. D'autre part, les études sur l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux routiers en fonction de l'historique de leurs sollicitations ne sont pas encore à même de fournir des lois de comportement utilisables, rendant actuellement impossible la mise en place d'une telle méthode.

Cette démarche nécessite donc encore de nombreux efforts de recherches. Des propositions récentes ont montré qu'il est possible d'introduire, dans le cadre de méthodes mécaniques empiriques, des notions de variabilités des facteurs intervenant dans le dimensionnement des chaussées. Ces travaux proposent que les dégradations mécaniques des matériaux puissent également être incluses dans cette notion de variabilité (Kim and Buch 2003).

2.3 Problématique des charges de trafic

Les sollicitations mécaniques prises en compte pour le dimensionnement des chaussées proviennent des charges de trafic. Rappelons qu'elles peuvent avoir d'autres origines, en rapport avec les conditions climatiques ou hydrogéologiques, mais ces aspects ne sont pas abordés dans le cadre du présent travail. Le trafic est décomposé en deux catégories : trafic léger ou trafic lourd. Le trafic lourd pris en compte en Suisse comprend l'ensemble des véhicules dont le poids total est supérieur à 3,5 to.

La plupart des méthodes de dimensionnement, y compris les méthodes mécaniques empiriques, utilisent la notion de trafic équivalent qui permet d'exprimer l'effet d'une multitude de charges différentes à partir d'une charge de référence. Une excellente description de la notion de facteur d'équivalence est donnée au premier chapitre du livre de David Cebon « Handbook of Vehicle-Road Interaction » (Cebon 1999).

2.3.1 Lois de puissance pour le trafic équivalent

Des études des résultats de l'essai AASHO ont montré qu'une bonne approximation des coefficients d'équivalence peut être obtenue par la formule suivante :

$K_i = \left(\frac{P_i}{P_{\text{réf}}} \right)^\alpha$	Eq. 2
--	-------

avec :

- K_i = coefficients d'équivalence (nombre d'essieux standards équivalents pour une charge P_i)
- P_i = charge d'un essieu i
- $P_{\text{réf}}$ = charge de l'essieu standard de référence
- α = coefficient de charge ou « puissance »

2.3.1.1 Essieu de référence

Ce genre de formule est largement utilisée pour obtenir des équivalences de charge, mais l'essieu de référence varie avec les pays : la Suisse utilise un essieu de 8,16 to (venant de l'essai AASHO), la France un essieu de 13 to (limite de charge légale des essieux simples moteur), les Pays-Bas 10 to. La tendance générale actuelle va vers l'utilisation d'un essieu de 11,5 to qui correspond à la limite légale de charge d'un essieu simple moteur admise par l'Union Européenne. L'essieu de référence choisi modifie évidemment le nombre d'essieux équivalents obtenus pour un trafic donné et il est donc nécessaire que la méthode de dimensionnement soit en accord avec la charge de référence utilisée.

2.3.1.2 Coefficient de charge ou « puissance »

Le coefficient de charge α dépend du type de structure étudiée : pour les chaussées souples, une valeur de 4 donne de bons résultats alors qu'il faut aller jusqu'à des valeurs de 12 pour des structures rigides. Les nombreuses études sur le sujet proposent diverses valeurs pour la puissance, comprises entre 2 et 6 (chaussées souples) et entre 8 et 33 (chaussées composites ou rigides) (Cebon 1999). De façon générale, on observe que la puissance augmente avec la rigidité de la chaussée.

A partir de données expérimentales, il est possible d'évaluer la puissance en déterminant la puissance à appliquer au rapport de deux charges pour obtenir le rapport entre le nombre de cycles nécessaires pour avoir une même dégradation :

$\left(\frac{P_x}{P_y} \right)^\alpha = \frac{N_y}{N_x}$	Eq. 3
---	-------

avec :

- P_x = essieu chargé à x tonnes
- P_y = essieu chargé à y tonnes
- N_x = nombre essieux P_x pour un état de dégradation défini
- N_y = nombre essieux P_y pour un état de dégradation défini
- α = coefficient de charge (à déterminer)

Un exemple, à partir de données issues de l'essai en vraie grandeur FORCE (OCDE 1991) et basé sur l'analyse du degré de fissuration, est présenté sur les figures suivantes. La Figure 3 illustre les puissances obtenues pour différents pourcentages de fissuration et pour une charge d'essieu passant de 10 à 11,5 to.

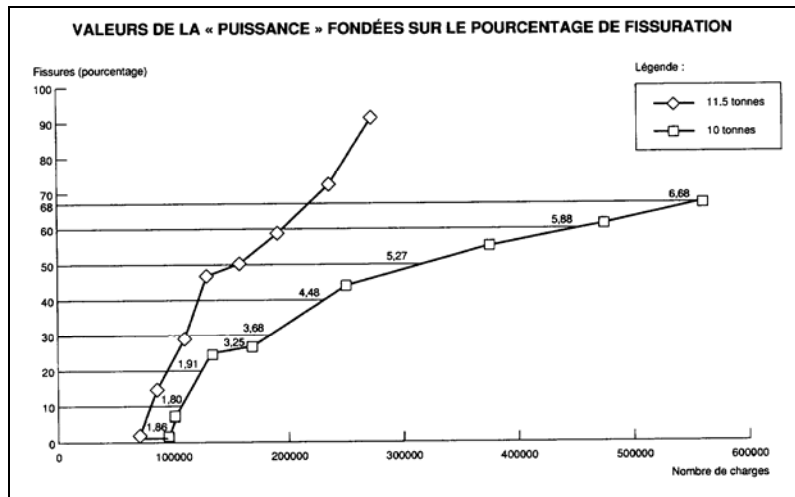


Figure 3 : Analyse des résultats de la fissuration lors du projet FORCE (OCDE 1991)

La Figure 4 montre que la puissance augmente avec le taux de fissuration retenu pour l'analyse, ce qui signifie que plus la structure est endommagée, plus l'effet des fortes charges est important.

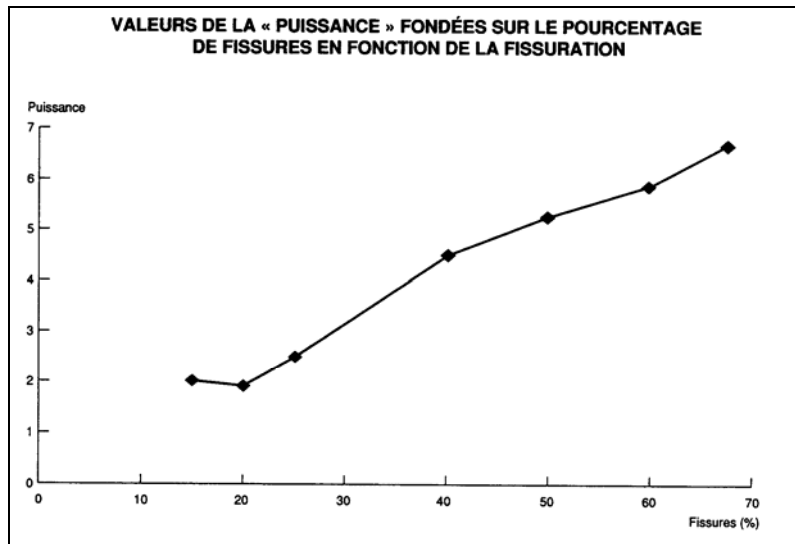


Figure 4 : "Puissance" obtenue en fonction du degré de fissuration de référence retenu, projet FORCE (OCDE 1991)

2.3.1.3 Configuration des essieux

La simple loi de puissance (Eq. 2, page 8) ne tient pas compte de la configuration du nombre d'axes des essieux (simple, tandem, tridem). Il est connu, notamment à partir de l'essai AASHO, que l'effet d'un essieu formé de plusieurs axes n'est pas égal à la somme des axes isolés. Pour tenir compte de ce phénomène, on applique des coefficients de correction à la loi de la puissance. Ces coefficients peuvent être appliqués directement sur le rapport des charges déjà élevé à la puissance ou sur le rapport des charges avant de l'élever à la puissance. La méthode française pour le dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC 1994) utilise la formule suivante :

$A_i = K \cdot \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha$	Eq. 4
---	-------

avec (selon la notation française) :

- A_i = agressivité d'un essieu (selon la définition française)
- P_i = charge d'un axe d'un essieu i
- P_0 = charge de l'essieu standard de référence (pour la France, $P_0 = 13\text{to}$)
- K = coefficient d'essieux
- α = coefficient de charge, souvent appelé « puissance »

Les valeurs utilisées pour la puissance sont de $\alpha = 5$ pour les structures souples et bitumineuses et de $\alpha = 12$ pour les structures semi-rigides ou en béton⁶.

Les coefficients K existent pour trois catégories d'essieux et dépendent des structures :

- Essieu simple : 1 (structure souple ou rigide)
- Essieu tandem : entre 0,75 (souple) et 12 (rigide)
- Essieu tridem : entre 1,1 (souple) et 113 (rigide)

Les valeurs de ces coefficients ont été déterminées par calculs pour obtenir des équivalences en regard des critères de dimensionnement retenus dans la méthode française. Par ailleurs, et comme pour la méthode de base des normes suisses, cette procédure nécessite de disposer d'une décomposition fine des données de trafic, puisque les seules charges par essieu ne sont pas suffisantes, mais qu'il faut également connaître la répartition entre les divers types d'essieu.

2.3.1.4 Technologie des véhicules

La technologie des véhicules a des conséquences non négligeables sur la dégradation des chaussées : l'utilisation de pneus simples en lieu et place des jumelages ou les nouveaux types de suspension ont une influence sur le calcul des charges équivalentes de trafic. Sur la base de travaux de Eisenmann, l'OCDE a proposé une formule définissant le dommage avec des coefficients tenant compte des facteurs relatifs à la technologie des véhicules et à leur configuration (Eisenmann 1975) (OCDE 1983) :

⁶ A noter que ces puissances de 5 et 12 correspondent aux pentes de fatigue données dans la méthode française de dimensionnement pour les matériaux bitumineux, respectivement pour les matériaux aux liants hydrauliques SETRA-LCPC (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique, Laboratoire central des ponts et chaussées - Service d'études techniques des routes et autoroutes: Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme (F).

$D_i = \left(k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{P_i}{P_{ref}} \right)^\alpha$	Eq. 5
---	-------

avec (notation selon l'OCDE) :

- D_i = dommage causé par un essieu (selon la définition OCDE)
 P_i = charge totale d'un essieu i
 P_{ref} = charge de l'essieu standard
 k_1 = coefficient pour le type d'essieux
 k_2 = coefficient pour le type de pneu
 k_3 = coefficient pour le type de suspension
 α = coefficient de charge, également appelé « puissance »

Les facteurs intervenant dans cette formule dépendent du type de structure pour lesquelles le trafic doit être calculé. Pour des structures souples et pour des écartements des axes des essieux tandem et tridem compris entre 1,35 et 1,50 m, les valeurs suivantes sont proposées (Tableau 1) :

Tableau 1 : Facteurs correcteurs pour le calcul du trafic équivalent

Facteurs	Caractéristiques	Valeurs
α	Puissance	4
k_1	Essieu simple	1.0
	Essieu tandem	0.6
	Essieu tridem	0.45
k_2	Roues jumelées standards	1.0
	Roues simples standards	1.3
	Roues simples super-larges	1.2
k_3	Suspensions traditionnelles	1.0
	Suspensions à air	0.95

2.3.2 Conditions réelles d'application des charges de trafic

Concrètement, les charges de trafic sont appliquées sur les chaussées par les pneumatiques qui exercent des efforts sur la surface de contact. La répartition des pressions de contact entre la chaussée et les pneumatiques dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels :

- intensité de la charge
- pression de gonflage du pneumatique
- type de pneumatique (profil, simple ou jumelés, marques, etc.)
- vitesse du véhicule

Les facteurs mentionnés ci-dessus ont des conséquences sur les charges de trafic, en particulier sur la forme des empreintes, sur la répartition et l'intensité des

pressions de contact et sur l'introduction d'efforts horizontaux. Il est important que les modélisations reproduisent au mieux les conséquences de ces facteurs.

2.3.2.1 Forme des empreintes

Huhtala a montré par des mesures que, pour des très faibles charges, les empreintes peuvent être considérées comme circulaires. Toutefois, ces conditions de chargement ne sont pas très réalistes. Par contre, une augmentation de la charge avec une pression constante conduit à un allongement des empreintes alors que leur largeur demeure quasi constante, aboutissant à une forme rectangulaire. Des analyses de signaux de déformations sur des structures de faible épaisseur lui ont permis de mettre en évidence cet allongement des empreintes. (Huhtala, Pihlajmäki et al. 1997)

Les nombreuses mesures effectuées avec le système VRSP⁷ développé en Afrique du Sud (De Beer, Fisher et al. 1997), ont confirmé que les empreintes ont une largeur quasiment constante, égale à celle de la bande de roulement du pneumatique, qui ne dépend ni de la charge ni de la pression de gonflage. Ce phénomène peut être expliqué par la grande rigidité latérale des pneumatiques qui s'oppose à leur déformation dans cette direction (Blab 1999). Concernant la longueur des empreintes, Blab montre qu'elle dépend de la rigidité longitudinale des pneumatiques et par conséquent du type de pneumatique. Les mesures des empreintes ont montré que pour certains pneus la longueur est supérieure à la largeur, avec des ratios largeur/longueur compris entre 0,55 et 0,65. Ceci conduit à conclure que les surfaces de charge pour ces types de pneus doivent être rectangulaires. En revanche, pour les pneus larges (en anglais « wide base »), le ratio largeur/longueur varie assez fortement en fonction de l'intensité de la charge et de la pression de gonflage. Toutefois, il est noté que si les pneumatiques sont chargés et gonflés selon les recommandations des fournisseurs, le ratio est en moyenne de 1, ce qui signifie que les empreintes sont carrées dans ces conditions.

Compte tenu des constats cités ci-dessus et en admettant que la pression de contact demeure constante, une augmentation de la charge se traduit uniquement par un accroissement de la longueur de l'empreinte, théoriquement proportionnel à celui de la charge. Des mesures d'empreintes ont été effectuées sur les pneus simples utilisés lors d'un essai en vraie grandeur à l'EPFL (cf. § 3.1)

⁷ Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array ; ce système permet la mesure des pressions de contact réelles (verticales, longitudinales et transversales) sous les pneumatiques

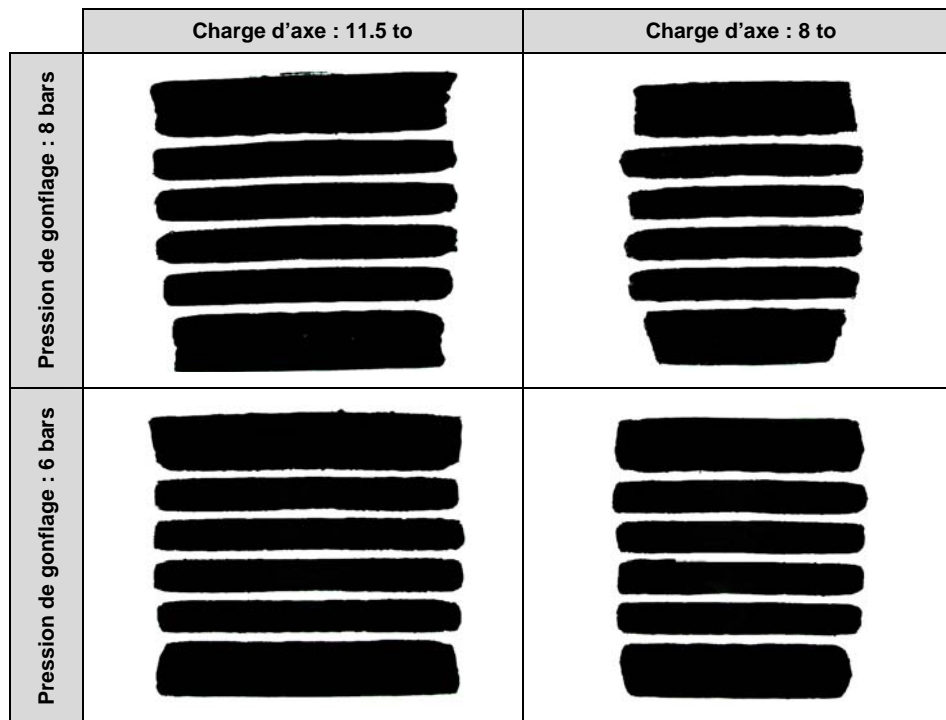


Figure 5 : Empreintes de contact des pneus simples utilisés dans le cadre des expériences de la halle-fosse pour quatre cas de charge

Ces empreintes confirment les observations mentionnées précédemment, à savoir des empreintes s'allongeant sous l'effet d'une augmentation de la charge. Dans les faits, l'allongement des empreintes n'est pas directement proportionnel à l'augmentation de la charge, ce qui s'explique probablement par la rigidité non négligeable du pneu dans la direction longitudinale. D'autre part, on observe que pour la charge de 8 to, les empreintes sont plus larges que longues, alors qu'elles sont pratiquement carrées pour la charge de 11,5 to avec 6 bars.

Si une augmentation de charge à pression constante se traduit essentiellement par un allongement des surfaces réelles de contact, il n'en est pas de même pour les modélisations utilisant une surface circulaire. Dans ce cas, on observe une augmentation du rayon de la surface qui se traduit par une augmentation des dimensions longitudinale et transversale.

2.3.2.2 Intensité de la pression verticale moyenne

L'hypothèse la plus souvent retenue pour la pression verticale de contact consiste à l'admettre comme égale à la pression de gonflage des pneus. Elle est alors appliquée sur une surface circulaire de façon à ce que son intégrale soit égale à la charge verticale totale. Une autre méthode, nécessitant de disposer d'empreintes de pneus, consiste à diviser la charge totale par la surface réelle de contact et de déterminer ainsi la pression moyenne qui est appliquée sur une surface circulaire.

Dans son analyse des mesures de pressions de contact effectuées avec le VRSPTA, Blab note que la pression moyenne réelle de contact dépend essentiellement de trois paramètres qui sont le type de pneu, la charge appliquée et la pression de gonflage

(Blab 1999). Il propose des formules intégrant ces trois paramètres pour déterminer la valeur de la pression moyenne verticale⁸.

Blab a étudié le ratio exprimant le rapport entre la pression moyenne de contact sur la surface et la pression de gonflage des pneus. Sur l'ensemble des mesures, ce ratio est généralement inférieur à 1, ce qui signifie que la pression verticale de contact moyenne réelle est inférieure à celle de gonflage. Des ratios supérieurs à 1 ont été obtenus, mais uniquement pour des pneus faiblement gonflés. Pour l'ensemble des pneus, le ratio tend à diminuer si la pression de gonflage augmente.

2.3.2.3 Répartition de la pression verticale de contact sur la surface de charge

La répartition des pressions de contact dépend principalement du type de pneumatique (technologie et marque), de la charge appliquée et de la pression de gonflage. En 1989, Yap signale que des pneus sous-gonflés et surchargés entraînent des augmentations des pressions dans les bords alors qu'un sur-gonflage tend à concentrer les pressions maximales au centre (Yap 1989).

Des informations précieuses, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, ont été obtenues sur la répartition réelle des pressions de contact des pneumatiques grâce aux mesures du système de mesure VRSPTA développé par De Beer (Figure 6). Ces mesures ont confirmé l'essentiel des observations faites par Yap : des pneus surchargés et sous-gonflés induisent des surpressions verticales dans les bords, alors que le sur-gonflage aboutit à une répartition relativement uniforme de la pression, quand bien même les valeurs maximales sont mesurées au centre des pneumatiques.

⁸ A noter que les surfaces de contact utilisées pour le calcul de la pression moyenne verticale sont des surfaces brutes, ce qui signifie qu'elles incluent les vides entre les profils des pneumatiques

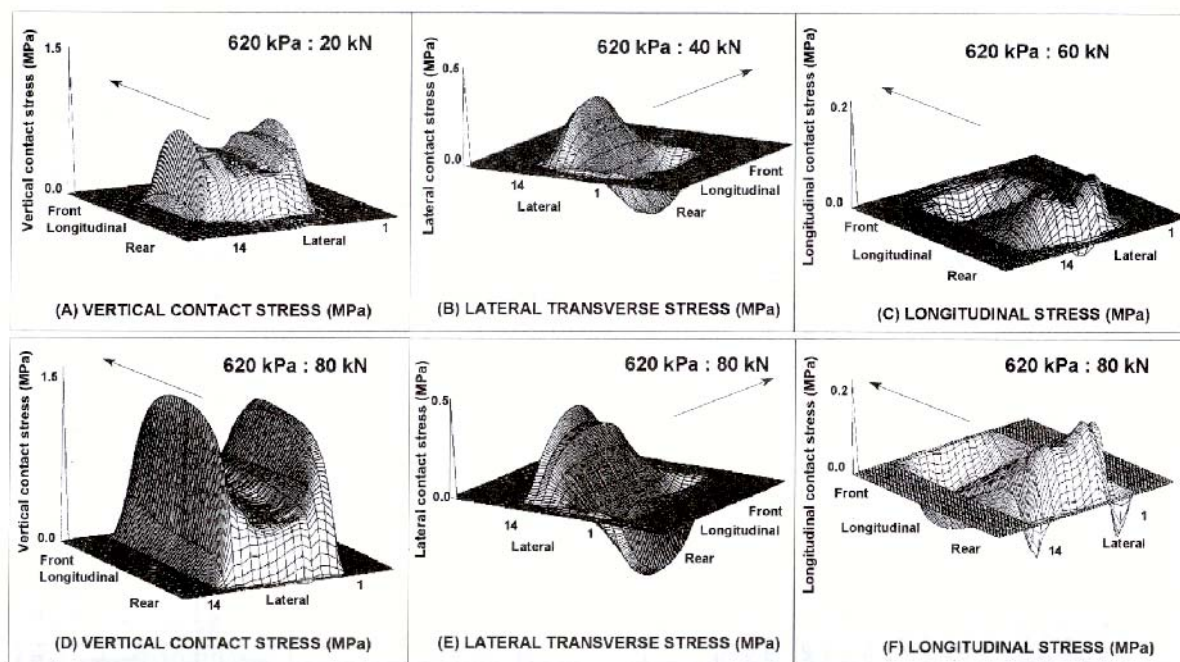


Figure 6 : Mesures de la répartition des pressions de contact d'un pneu pour différentes conditions de charge (De Beer, Fisher et al. 1997)

D'autres mesures effectuées avec le VRSPTA ont confirmé que ces répartitions dépendent des dimensions et de la conception des pneumatiques mais aussi de la marque (Mante, Molenaar et al. 1995), (Blab 1999).

Les analyses effectuées par De Beer et Blab proposent de différencier la valeur de la pression verticale sur les bords des pneumatiques q_e (e pour edge) et celle sur le centre q_c (c pour centre). Les mesures montrent que, pour des pneus simples, la zone centrale correspond à environ 60% de la largeur alors que les 40% restant se divisent entre les deux bords⁹. La pression q_e sur les bords des pneumatiques dépend essentiellement de la charge alors que la pression sur le centre q_c dépend aussi de la pression de gonflage. Par ailleurs, Blab propose d'utiliser un facteur α de distribution de la charge. Ce facteur exprime le ratio entre la force totale exercée sur le centre du pneu et celle appliquée sur les bords. Il propose aussi des formules pour le calcul de α . Sur la base de nombreuses mesures fournies par le système VRSPTA, Blab a mis au point un logiciel permettant de définir des charges utilisables dans le cadre de programme d'éléments finis (Blab and Tarvey 2000). Ces travaux montrent qu'il est possible de déterminer des répartitions non uniformes théoriques de la pression verticale satisfaisantes pour des modélisations visant à évaluer leur effet.

2.3.2.4 Efforts horizontaux

Yap a mis en évidence l'existence d'efforts transversaux et longitudinaux sur la surface de contact (Yap 1989), ce que les mesures du VRSPTA ont confirmé (cf. Figure 6, page 16). L'ensemble des mesures actuellement disponibles ayant été effectuées sur des pneus montés sur des essieux non-moteurs, la résultante des

⁹ Ces proportions sont en accord avec le profil de la plupart des pneus simples : sur les empreintes des pneus de Halle-fosse (Figure 5, page 14), la largeur des deux bandes extérieures correspond environ au 40 % de la largeur totale

charges horizontales mesurées est toujours nulle. Il est possible d'obtenir dans la littérature des ratios entre les valeurs maximales mesurées pour les efforts verticaux, transversaux et longitudinaux. A titre d'exemple et sur la base de mesures effectuées avec le VRSPTA, les valeurs de 10/3.6/1.4 (De Beer, Fisher et al. 1997) et de 10/3/1 (Mante, Molenaar et al. 1995) ont été proposées.

Toujours à partir de mesures du VRSPTA, Groenendijk propose de décomposer les efforts transversaux en deux contributions ayant des origines différentes (Groenendijk 1998). La première est formée de contraintes de cisaillement localisées dans les zones de contact du pneumatique et dirigées vers l'extérieur de ces zones (schéma en zigzag selon la Figure 7).

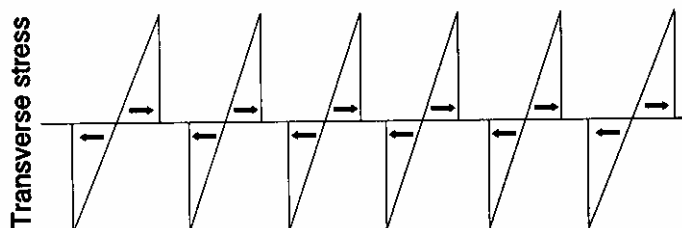


Figure 7 : Répartition des efforts transversaux dus à la nature du caoutchouc des pneumatiques (Groenendijk 1998)

Elles sont dues à la nature du caoutchouc des pneumatiques qui subit une importante compression verticale et tend à vouloir s'étendre latéralement en raison de la valeur élevée de son coefficient de Poisson, créant ainsi des forces de friction à l'interface entre le pneumatique et le revêtement. L'effet de ces efforts, qui agissent très localement dans les zones immédiates de contact entre la chaussée et les pneumatiques, n'est pas abordé dans le cadre de ce travail.

La seconde contribution pour les efforts transversaux se compose de contraintes de cisaillement réparties sur l'ensemble de la surface de contact et qui sont dirigées soit vers le centre soit vers l'extérieur, ceci en fonction de la relation entre la charge et la pression de gonflage des pneumatiques (Figure 8).

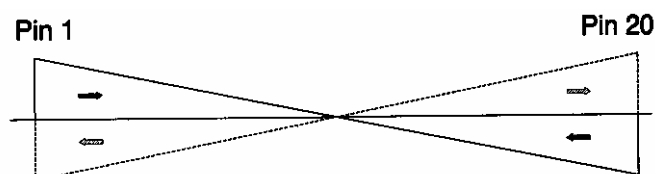


Figure 8 : Répartition des efforts transversaux pour des pneus dont la pression de gonflage n'est pas adaptée à la charge (Groenendijk 1998)

Ces contraintes apparaissent lorsqu'il y a une différence significative entre les pressions de gonflage et de contact : dans le cas de pneu sous-gonflé et surchargé, soit dans le cas contraire, un pneu sur-gonflé et sous-charge. Elles s'orientent vers le centre dans le premier cas et vers l'extérieur dans le second. Ces contraintes sont dues aux bords rigides des pneus qui influencent non seulement la répartition des pressions verticales (cf. § 2.3.2.2 et 2.3.2.3), mais induisent également ces efforts transversaux en poussant ou en tirant sur les bords des pneus.

Les efforts longitudinaux, mesurés avec le VRSPTA uniquement sur des essieux non-moteurs, sont les moins importants et ils trouvent certainement leur origine, comme les premiers efforts transversaux décrits, dans la nature de la gomme des pneumatiques. Pour les pneus des essieux moteurs, il est probable que des composantes longitudinales plus importantes existent et qu'elles puissent avoir des

conséquences sur les sollicitations à faible profondeur. Toutefois, en raison du manque de données existant concernant ces efforts liés à la motricité, cette problématique n'est pas abordée dans le cadre de cette étude.

2.3.2.5 Type de roues

L'effet du type de roues concerne généralement les différences pouvant être observées entre des roues simples ou des roues jumelées. Si on ne fait généralement pas de différences entre les divers types de roues jumelées¹⁰, il existe un grand nombre de pneus différents pour les roues simples, puisque les largeurs de leurs bandes de roulement peuvent quasiment aller du simple au double. Ces pneus simples sont généralement considérés comme plus dommageables pour les chaussées routières en raison de l'augmentation des pressions de contact qu'ils engendrent. Cette augmentation est le résultat d'une augmentation globale des pressions de gonflage utilisées pour ce genre de pneus et de la réduction de leur surface de contact. En raison de leur largeur totale supérieure, les empreintes des roues jumelées sont généralement plus courtes que celles des roues simples.

Concernant les types de roues, il convient de mentionner l'existence d'une revue bibliographique des différences observées entre l'utilisation de roues simples ou jumelées (Groenendijk 1999). Les résultats qui y sont présentés confirment généralement la plus grande agressivité des pneus simples.

Le type de pneu peut être pris en compte dans certaines méthodes de calcul du trafic équivalent (cf. Eq. 5, page 12). Il peut également être modélisé sans grande difficulté dans le cadre de calculs linéaires en appliquant deux surfaces de chargement pour les roues jumelées.

2.3.2.6 Vitesse

La vitesse de la charge n'a pas d'influence directe sur les modélisations admettant un comportement élastique des matériaux. En revanche, le choix du module retenu pour les matériaux bitumineux dépend de la fréquence de sollicitation utilisée lors des essais. La fréquence à utiliser est liée à la vitesse à laquelle la charge se déplace, une augmentation de la vitesse conduisant à une augmentation de la fréquence. Toutefois, il n'existe que peu d'études mettant en relation ces deux grandeurs. Dans le logiciel de formulation PRADO (Francken 1997) édité par le CRR, la relation suivante est proposée :

$f(\text{Hz}) = 0,45 \cdot V(\text{km/h})$	Eq. 6
--	-------

Il n'est pas rare que la fréquence à utiliser pour le dimensionnement soit fixée dans le cadre de la méthode de dimensionnement. A titre d'exemple, la méthode française impose d'utiliser les modules déterminés à partir d'essais en laboratoire effectués avec des sollicitations de 10 Hz.

Des méthodes pour définir au mieux la forme des sollicitations pour s'approcher des sollicitations réelles dans les chaussées sont récapitulées dans « Pavement Analysis and Design » (Huang 1993). Ces méthodes utilisent plutôt la notion de « temps de chargement » (inversement proportionnel à la fréquence) et toutes présentent la

¹⁰ Elles ont des dimensions relativement standardisées, notamment en ce qui concerne leur largeur

vitesse comme le principal paramètre influençant cette grandeur. Certaines relations incluent également la profondeur dans la structure comme paramètre influençant les temps de chargement (Brown 1973). Toutefois, il apparaît d'importantes différences entre les méthodes proposées et ces dernières ne sont pas à même de définir des valeurs pour les fréquences à utiliser lors des essais en laboratoire.

La vitesse de la charge joue également un rôle non négligeable sur l'évaluation de la résistance des matériaux bitumineux à la fatigue et à l'orniérage. Comme pour le module, elle intervient, par l'intermédiaire de la fréquence, dans la détermination en laboratoire de la résistance à la fatigue. D'un autre côté, il est unanimement reconnu que le développement des ornières dans les matériaux bitumineux dépend fortement de la vitesse d'application des charges : plus les charges sont appliquées lentement, plus l'orniérage est important¹¹.

En plus de ces problèmes en rapport avec les temps d'application des charges, la vitesse influence les temps de repos entre les charges. Par comparaison avec les essais en laboratoire qui utilisent essentiellement des sollicitations périodiques sans aucun temps de repos, les charges de trafic sont appliquées selon des répartitions temporelles aléatoires dépendant de la distance entre les véhicules, de leur type (distance entre les axes) et de leurs vitesses de déplacement. Pour les chaussées routières, les temps de repos entre les charges sont en général sensiblement supérieurs aux temps de chargement. Dans ces conditions, il a été démontré que « l'insertion de périodes de repos accroît la durée de vie en fatigue ; la durée des périodes de repos a une forte influence sur cet accroissement quel que soit le mode de sollicitation » (Francken 1979).

Si les distances entre les véhicules conduisent généralement à des temps de repos importants, il n'en va pas de même dans le cas d'essieux comportant plusieurs axes (essieu tandem ou tridem). Dans cette situation et pour des vitesses suffisamment élevées, les sollicitations induites par les différents axes peuvent se cumuler et devenir plus néfastes pour les chaussées vis-à-vis de leur résistance à la fatigue. Cette situation peut être illustrée à partir de signaux de déformation enregistrés lors du passage à 80 km/h d'un véhicule comprenant des essieux tandem à l'avant et à l'arrière (Figure 9).

¹¹ A titre d'exemple, dans des situations impliquant des vitesses réduites, voir des chargements statiques (places de parc, zones à proximité des feux de signalisation), même les faibles charges du trafic léger peuvent conduire à des déformations permanentes très importantes

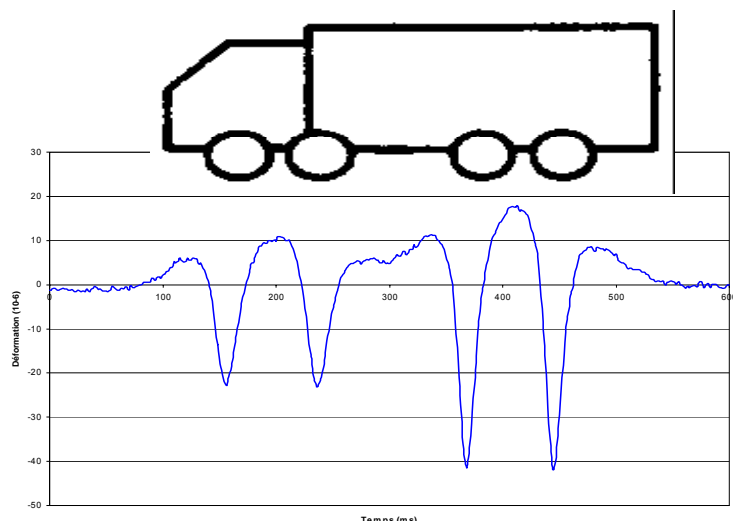


Figure 9 : Signal de déformations longitudinal lors du passage à 80 km/h d'un véhicule composé de deux essieux tandem

Si les amplitudes des extensions maximales sont relativement similaires pour les axes des deux essieux tandem, dont la charge est similaire, on observe en revanche que les contractions enregistrées entre les axes ne sont pas nulles, illustrant ainsi l'effet de superposition des charges.

2.3.3 Le trafic pour le dimensionnement empirique : exemple des normes suisses

L'essai AASHO a permis d'exprimer l'effet d'une charge d'essieu donnée en fonction d'une charge de référence et d'établir de la sorte des coefficients d'équivalence pour diverses charges. Cette démarche a conduit à la définition de la notion d'« essieux équivalents » (en anglais ESAL : Equivalent Standard Axle Load) largement utilisée dans le domaine de la construction routière. Cette notion est à la base des classes de trafic définies dans les normes suisses. Les coefficients d'équivalence correspondent au rapport entre le nombre de charges d'intensité P_i et le nombre de charges de degré $P_{\text{réf}}$ aboutissant à une dégradation similaire d'une chaussée. La charge de référence pour l'essai AASHO était de 18'000 Lb (8,16 to) et c'est encore elle qui est utilisée en Suisse.

Dans sa procédure de base, la norme « Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent » (SN 640320) donne les coefficients d'équivalence permettant d'exprimer le trafic lourd en nombre d'essieux équivalents. Ces coefficients tiennent compte du type de chaussée (souple ou rigide) et du type d'essieu (simple, tandem ou tridem) des véhicules lourds. Cette procédure nécessite des pesages détaillés des véhicules, fournissant la charge et le type de chacun des essieux. Si ces données ne sont pas disponibles, la norme propose trois méthodes d'estimation basées sur des analyses de trafics enregistrés sur des autoroutes suisses par des stations de pesage en marche, stations WIM¹² (COST_323 1998). Ces méthodes sont applicables à partir de données de trafic plus générales, telles que des relevés visuels, des comptages ou des statistiques, et pour différents types de routes.

Les normes suisses ne prévoient pas d'autre analyse du trafic que celle aboutissant au trafic équivalent. Cette méthode implique une simplification considérable de la

¹² Weigh-in-motion, en français pesage en marche

prise en compte des charges de trafic puisqu'elle fait correspondre une combinaison de charges à une combinaison de processus de dégradation des chaussées. Pour les coefficients d'équivalence issus de l'essai AASHO, les analyses sont basées sur un indice global d'état d'une chaussée, le PSI (Present Serviceability Index). Selon cette méthode, les dégradations des chaussées routières dépendent uniquement de l'intensité des charges par essieux, du type d'essieu et du type de structure. Elle ne permet pas de tenir compte d'autres facteurs influençant les dégradations des chaussées, parmi lesquels :

- l'ordre d'application des charges : une charge isolée de forte intensité peut provoquer une brusque dégradation de la chaussée la rendant beaucoup plus sensible aux charges suivantes, mêmes si ces dernières sont peu importantes
- la température lors de l'application des charges : les phénomènes de fatigue et d'orniérage sont extrêmement sensibles à ce paramètre
- la vitesse des véhicules qui influence considérablement le développement des déformations permanentes dans les matériaux bitumineux
- la variation des types de pneumatique (pneus jumelés ou simples) et de leur pression de gonflage.

Des méthodes de calcul pour le trafic équivalent ont été développées en s'inspirant directement de l'essai AASHO ou d'autres résultats d'essais en vraie grandeur ou encore à partir de calculs analytiques. Certaines méthodes permettent d'introduire quelques-uns des paramètres mentionnés ci-dessus.

2.3.4 Le trafic dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement

Ces méthodes utilisent fréquemment la notion de trafic équivalent pour un essieu de référence donné. Cet essieu de référence est modélisé et sert de charge pour le calcul des contraintes et des déformations à partir desquelles le nombre d'essieux de référence que la structure peut supporter est calculé. Ce résultat est comparé au trafic équivalent prévu pour la structure à dimensionner.

Lorsque le dimensionnement mécanique empirique se base sur un comportement élastique des matériaux, la charge servant au calcul des sollicitations est définie par trois paramètres, lesquels sont liés entre eux, la définition de la valeur de deux d'entre eux impliquant la valeur du troisième :

1. intensité totale
2. pression de contact
3. surface de contact.

Les modèles multicouches basés sur la théorie de Burmister (cf. 2.4) utilisent une surface circulaire chargée avec une pression constante, les surfaces étant définies par l'intermédiaire de leur rayon. Grâce à la linéarité des matériaux, il est possible de modéliser des roues jumelées, voir des essieux tandem ou tridem, en répartissant la charge sur plusieurs surfaces et en sommant leurs contributions. Toujours en vertu de la linéarité des matériaux, il est possible de définir des surfaces de chargement et des répartitions des pressions verticales plus complexes (Mante, Molenaar et al. 1995). Cette possibilité est à ce jour peu utilisée dans le cadre du dimensionnement des chaussées, malgré l'existence de logiciel permettant cette procédure sans recourir à de nombreux calculs séparés (Balay 1998).

2.4 Outils pour la modélisation des superstructures routières

La modélisation des chaussées routières dans le cadre des méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement se fait généralement en admettant une décomposition de la superstructure en couches successives d'épaisseur constante. La plupart des calculs élastiques sont effectués avec des logiciels basés sur le modèle multicouche de Burmister présenté ci-après.

2.4.1 Le modèle multicouche de Burmister

Burmister a traité le problème général d'une structure de n couches sollicitée par une charge circulaire uniformément répartie, selon le schéma suivant :

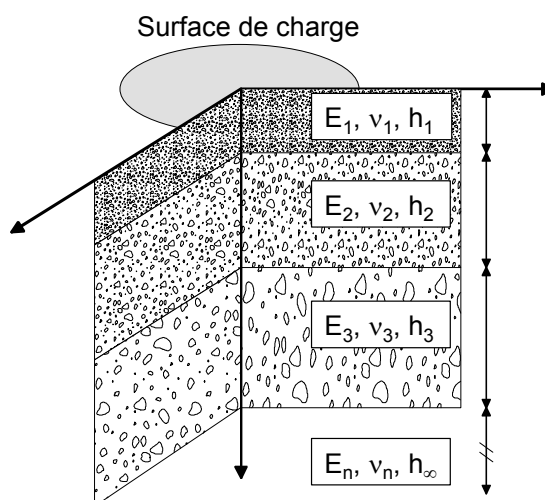


Figure 10 : Schématisation du modèle de Burmister

Ce modèle est à la base des modèles dits multicouches utilisés dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement et exige les hypothèses suivantes :

- la charge est introduite par une pression uniforme appliquée sur une surface circulaire de rayon a
- chaque couche est constituée d'un matériau homogène, isotrope, suivant un comportement élastique linéaire
- les couches sont infinies en plan et ont une épaisseur constante
- la couche la plus profonde a une épaisseur infinie
- les interfaces entre les couches sont collées, partiellement collées ou libres.

Chaque couche est définie par trois paramètres : son épaisseur h , son module d'élasticité E et son coefficient de Poisson ν . Il est généralement possible d'introduire différentes conditions aux interfaces entre les couches, allant d'un collage parfait (déplacement identiques des deux couches) à un glissement total entre les couches (déplacement libre d'une couche par rapport à l'autre).

Les contraintes et les déplacements dans un tel modèle sont déterminés à partir de la fonction de contrainte suivante (Van Cauwelaert 1995) :

$\varphi_i = pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{mz} - zD_i e^{-mz}] dm$	Eq. 7
--	-------

avec :

- a = rayon de la surface de chargement
- p = pression de chargement uniformément répartie
- r = distance radiale en coordonnées cylindriques
- z = profondeur
- A_i, B_i, C_i, D_i = paramètres inconnus déterminés par les conditions aux limites
- J_0 = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0
- J_1 = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1
- m = paramètre d'intégration

Le détail des équations pour le calcul des contraintes et des déplacements obtenues à partir de cette fonction de contrainte est donné en annexe 8.1.

2.4.2 La charge dans le modèle de Burmister

Dans un tel modèle, la charge doit être définie par le type de roue, la pression verticale et le rayon de la surface de contact. L'hypothèse communément retenue consiste à admettre que la pression de contact est égale à la pression de gonflage du pneumatique et que le rayon de la surface se calcule à partir de l'intensité totale de la charge¹³.

La fonction de contrainte servant au calcul des contraintes et des déplacements n'utilise que deux paramètres pour décrire la charge : la pression verticale (p) et le rayon (a) de la surface sur laquelle elle agit. L'équation de base, et par suite toutes celles utilisées pour le calcul des contraintes et déplacements, montre que les résultats sont directement proportionnels à la valeur de la pression p, mais qu'il n'existe pas de relation directe avec le rayon a de la surface sur laquelle la charge verticale est appliquée, puisque ce rayon intervient dans le calcul de la fonction de Bessel à l'intérieur de l'intégrale. La relation de proportionnalité entre les résultats des calculs et la pression de contact ne fait qu'exprimer le principe de linéarité du comportement des matériaux.

¹³ C'est notamment le cas du logiciel Noah dans lequel la charge est définie à partir de trois paramètres : types de roues (y compris l'espace entre les pneus en cas de jumelage), l'intensité de la charge et la pression de contact

3. Déformations des couches bitumineuses

3.1 Mesures de déformations sur des structures en vraie grandeur

Les réponses utilisées dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement proviennent de modélisations impliquant de nombreuses simplifications pour la description de la charge et de la structure. Il est nécessaire que ces calculs puissent être validés par des mesures effectuées sur des structures soumises à des charges réelles et ayant des dimensions réelles. De telles mesures peuvent être obtenues par la construction des structures dans des installations prévues spécialement à cet effet. Ces structures sont alors instrumentées de façon à obtenir des mesures de différentes grandeurs telles que déformations, déplacements, contraintes, etc. On parle alors généralement d'essais en vraie grandeur. Une autre méthode consiste à instrumenter, lors de leur réalisation ou de leur renforcement, des chaussées réellement en service.

Les mesures utilisées dans le cadre de ce travail proviennent principalement d'essais en vraie grandeur réalisés par le LAVOC dans la halle-fosse de l'EPFL. Les mesures des déformations dans les couches bitumineuses ont généralement été faites au bas des couches de base. Les mesures effectuées présentent l'avantage que la plupart des paramètres influençant les déformations des couches bitumineuses sont maîtrisés, permettant d'effectuer des comparaisons en faisant varier chacun de ces paramètres.

L'expérience ayant fourni les mesures de déformations qui ont été analysées pour la présente étude a été réalisée dans le cadre du mandat de recherche "Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: enrobés à haut module" financé par l'OFROU¹⁴. Ce mandat avait pour but d'évaluer le comportement mécanique d'enrobés à module élevé par des essais en laboratoire et par la réalisation d'un essai en vraie grandeur, ceci afin de préparer leur introduction dans les normes routières suisses. Les résultats détaillés de cette recherche, y compris la description complète des expériences en vraie grandeur, sont disponibles dans un rapport (Perret, Dumont et al. 2001).

La première partie de l'expérience consistait à effectuer des mesures de réponses pour différentes conditions de chargements et diverses températures.¹⁵ Deux intensités de charge et trois pressions de gonflage ont été utilisées pour des pneus simples et des pneus jumelés. Les températures de référence étaient de -5°C, 5°C, 15°C et 30°C. Les mesures ont nécessité l'application d'environ 15'000 charges sur chacune des structures. Ce nombre limité de charge permet d'admettre que les structures n'ont pas été endommagées durant les mesures de réponse.

La seconde partie visait à évaluer la résistance des couches de base vis-à-vis de l'orniérage en appliquant un grand nombre de charges sur les sections dans des conditions de température particulièrement défavorables (50°C). Cette expérience a été menée pour un seul cas de charge et n'est pas analysée dans ce travail.

¹⁴ Office Fédéral des Routes, Berne

¹⁵ On entend par "réponses" les déformations instantanées mesurées au passage d'une charge

3.1.1 Description des structures

Trois structures différentes ont été testées (Figure 11).

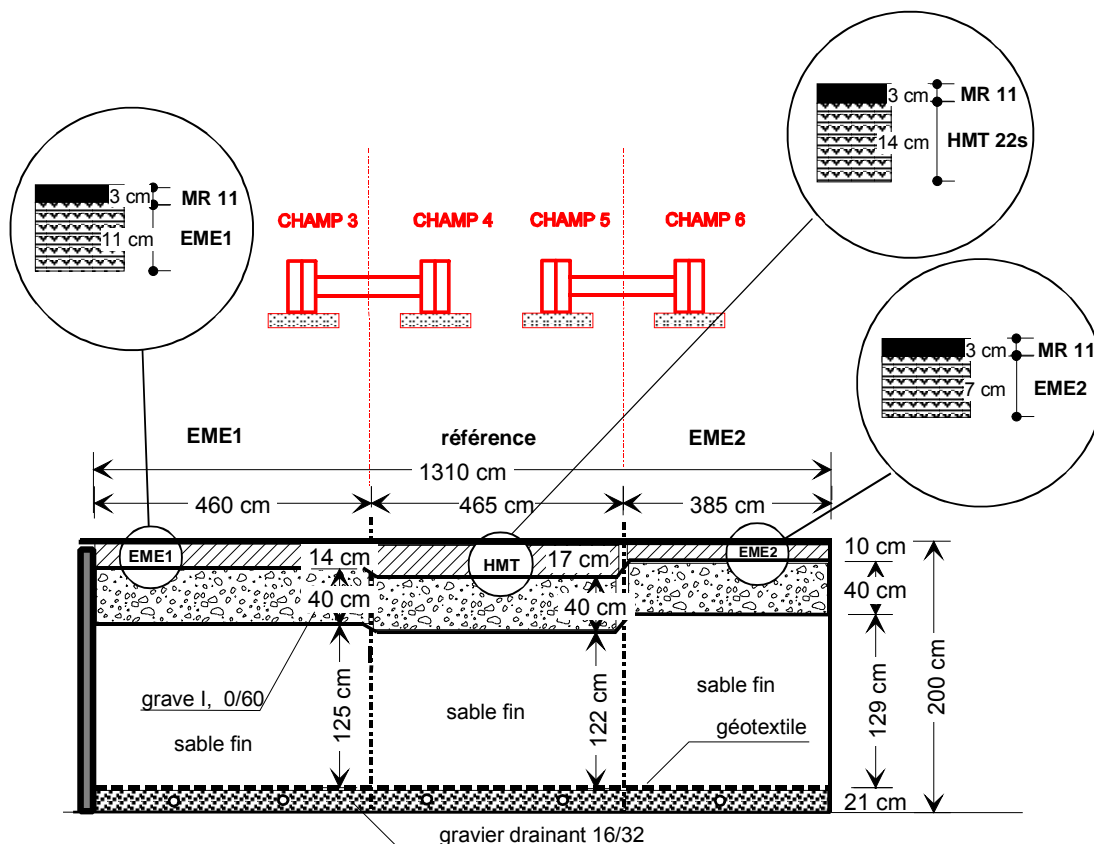


Figure 11 : Structures construites à la halle-fosse pour l'évaluation des enrobés à module élevé (Perret, Dumont et al. 2001)

où :

- MR 11 = macro rugueux 11 selon (SN 640435), couche de roulement
- EME = enrobé à module élevé (type 1 ou 2), couche de base
- HMT 22s = enrobé à chaud pour couche de base selon (SN 640431), couche de base
- Grave I = grave de qualité I 0/60 mm selon (SN 670120), couche de fondation
- Sable fin = sable 0/2 mm lavé, sol de fondation.

Ces structures ne se différencient que par les épaisseurs et le type de matériaux bitumineux de la couche de base. En revanche, elles ont toutes une même couche de roulement de 3 cm en MR11.

Une section de référence, correspondant à une structure T4-S2 selon la norme suisse de dimensionnement (SN 640324), a été construite avec une couche de base de 14 cm en HMT 22s, l'épaisseur totale des couches bitumineuses étant donc de 17 cm. De part et d'autre de cette section, deux sections utilisant des enrobés à module élevé (EME) différents comme couche de base ont été construites. Le premier EME, désigné comme type 1 (EME1), favorise la résistance à l'orniérage alors que le second, désigné comme type 2 (EME2), privilégie la résistance à la

fatigue. La structure utilisant une couche de base en EME1 présente une épaisseur totale de 14 cm (11+3) alors que celle en EME2 est de 10 cm (7+3). Les couches bitumineuses reposent sur 40 cm de grave I servant de couche de fondation alors que la fosse a été remplie de sable pour remplacer le sol de fondation.

3.1.2 Instrumentation et mesures

L'instrumentation des champs a notamment permis des mesures de déformations dans les couches bitumineuses au bas des couches de base (à des profondeurs absolues variables selon le champ) et à l'interface entre la couche de base et celle de roulement (à une profondeur constante de 3 cm quel que soit le champ). Des mesures ont été faites en faisant varier trois paramètres des charges de trafic, soit :

1. l'intensité de la charge (par axe) appliquée sur la chaussée :
 - $P_1 = 8$ tonnes : charge de l'essieu de référence émanant de l'essai AASHO et utilisé actuellement en Suisse (8,16 to)
 - $P_2 = 11,5$ tonnes : charge de l'essieu normalisé européen
2. la pression de gonflage des pneumatiques :
 - trois valeurs de pressions, soit 6 bars, 7 bars et 8 bars¹⁶.
3. le type de roue :
 - roues jumelées : Michelin 295/80R22.5 XDA 4TL
 - roue simple (ou super single) : Michelin 385/65R22.5 ENERGY XTA TL

La combinaison de ces paramètres aboutit à 12 cas de charge différents qui permettent d'étudier séparément les trois paramètres de chargement. Des déformations ont été analysées pour trois températures (5°C, 15°C et 30°C).

3.2 Signaux de déformations expérimentaux dans les couches bitumineuses

Pour clairement définir les valeurs des déformations utilisées dans ce travail, des remarques préliminaires concernant la forme des signaux enregistrés lors du passage d'une charge sont nécessaires. Ces remarques concernent les signaux de déformations horizontales au bas de la couche de base et au bas de la couche de roulement. La forme de ces signaux se distingue selon la direction - longitudinale ou transversale - dans laquelle les mesures sont effectuées. Pour mieux comprendre l'allure générale des signaux, il est utile d'avoir une idée de la déformée des couches bitumineuses durant le passage d'une charge de trafic (Figure 12).

¹⁶ Il convient de signaler que ces pressions sont relativement faibles en comparaison de celles utilisées réellement. Toutefois, l'équipement d'air comprimé à disposition dans la halle d'essai ne permettait pas d'atteindre des pressions supérieures

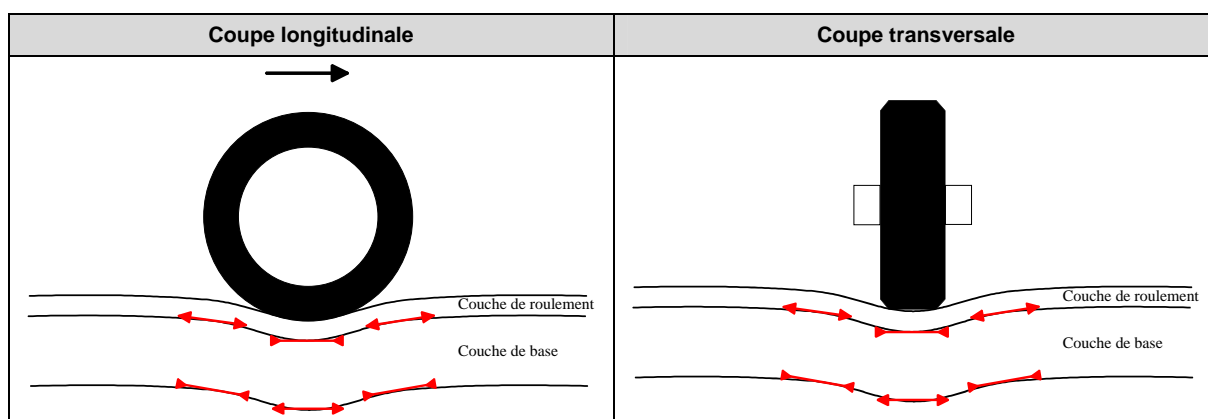


Figure 12 : Déformée des couches bitumineuses lors du passage d'une roue

Ces déformées (fortement exagérées) permettent d'anticiper l'allure générale des signaux de déformations longitudinaux et transversaux en fonction du déplacement de la charge. L'image de gauche montre que les matériaux subissent des déformations longitudinales alternant entre contraction et extension durant le passage de la charge. Cette alternance existe quelles que soient la position latérale et la profondeur de mesure envisagée¹⁷. De plus, selon la profondeur, l'alternance se fera toujours dans le même ordre, soit :

- au bas de la couche de roulement : extension – contraction – extension
- au bas de la couche de base : contraction – extension – contraction.

De son côté, l'image de droite montre qu'il n'y a pas d'alternance des déformations transversales durant le passage de la charge : les matériaux sont toujours soit en contraction, soit en extension. Ils sont en contraction ou en extension selon la position du point de mesure, tant latéralement (position par rapport au centre de la charge) que verticalement (profondeur dans les couches bitumineuses). En simplifiant, il est possible de résumer de la façon suivante :

- au bas de la couche de roulement : contraction dans la zone sous la charge et extension en dehors de cette zone
- au bas de la couche de base : extension dans la zone sous la charge et contraction en dehors de cette zone.

Au-delà de ces considérations générales, il est nécessaire de séparer les signaux de déformations en fonction de la profondeur. Les signaux retenus pour ce qui suit correspondent à des mesures effectuées au centre de la charge.

3.2.1 Déformations horizontales au bas de la couche de base

La forme générale des signaux de déformations au bas des couches de base n'est pas influencée par la température. Les signaux présentés correspondent à une température de 30°C (Figure 13).

¹⁷ Il est utile ici de proposer une analogie avec les déformations d'une poutre encastree soumise à une charge ponctuelle : la fibre inférieure est tendue au droit de la charge (alors que la fibre supérieure est contractée) et cette situation s'inverse au-delà des points d'inflexion situés de part et d'autre de la charge

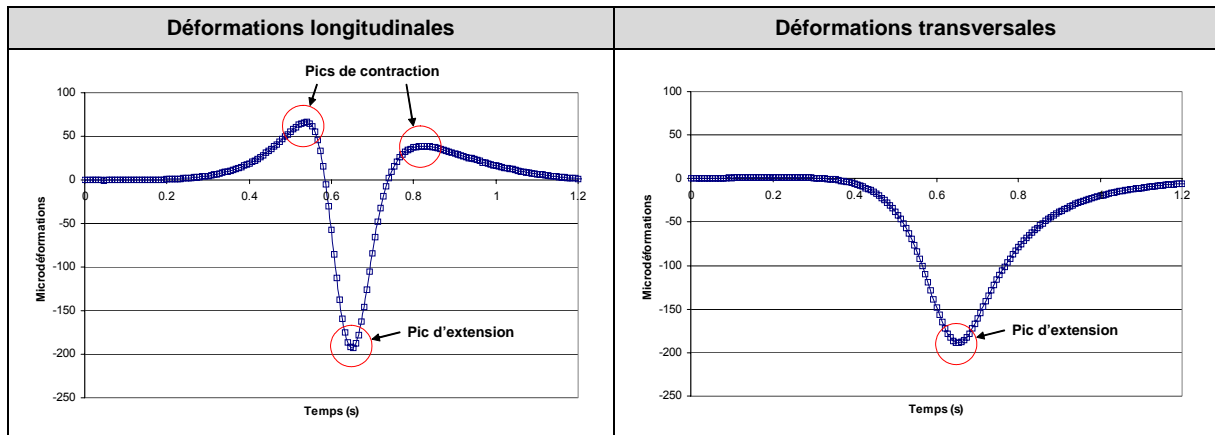


Figure 13 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de base

Comme prévu à partir des déformées de la Figure 12, les sollicitations longitudinales présentent une alternance des déformations pendant le passage de la charge, alternance qui se traduit sur les signaux par les pics de contraction visibles sur l'image de gauche. En revanche, les sollicitations transversales sont uniquement en extension. Par ailleurs, tous les signaux présentent une nette dissymétrie des courbes de part et d'autre des pics d'extension, dissymétrie qui s'explique par le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux. De plus, pour les mesures longitudinales, le pic de contraction avant le passage de la charge est systématiquement plus important que celui après son passage.

3.2.2 Déformations horizontales au bas de la couche de roulement

Pour les signaux au bas de la couche de roulement, par analogie avec ce qui a été observé jusque là, il semble logique que les signaux soient des images symétriques de celles obtenues au bas des couches bitumineuses. Si tel est le cas, les signaux longitudinaux doivent présenter des extensions avant et après le passage de la charge alors qu'une importante contraction doit être visualisée lors du passage de la charge. Pour les signaux transversaux, on peut s'attendre à une simple contraction. Toutefois, la visualisation des signaux au bas de la couche de roulement montre que ce n'est que partiellement le cas (Figure 14).

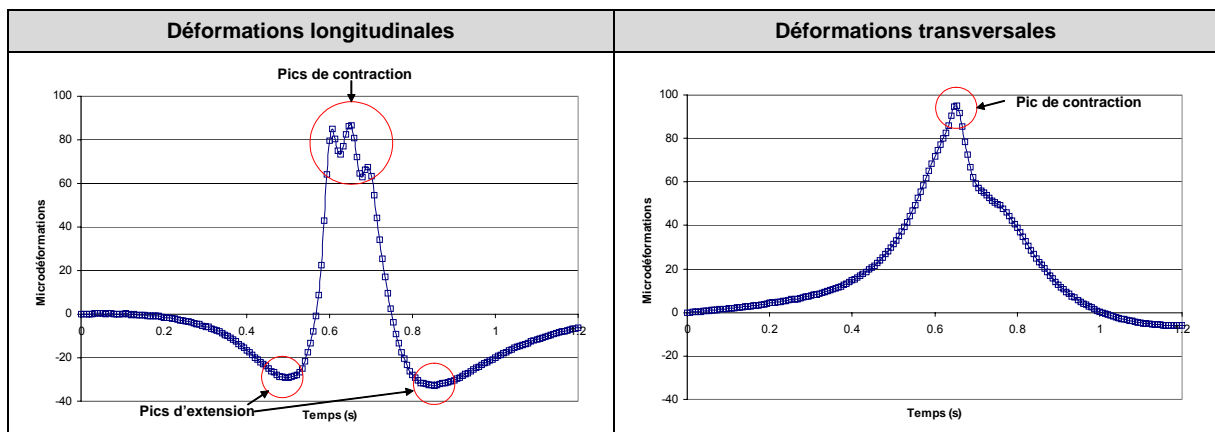


Figure 14 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (30°C)

Sur les signaux longitudinaux, les extensions escomptées avant et après le passage de la roue sont bel et bien présentes. En revanche, on observe que la zone de contraction ne présente pas un seul pic clairement défini, mais plutôt une zone avec

des « irrégularités » qui semblent indiquer la présence de trois pics de contraction. Les signaux transversaux donnent en revanche une image relativement conforme à celle attendue, avec un seul pic clairement marqué. Toutefois, le signal semble également indiquer des « irrégularités » (variations de déformations étonnantes), surtout après ce pic.

Le comportement viscoélastique se traduit à nouveau par une dissymétrie des signaux, mais celle-ci est inverse à celle observée au bas des couches : l'extension mesurée avant le passage de la charge est inférieure à celle mesurée après. Si cette inversion de tendance concernant la visibilité du comportement viscoélastique est valable pour toutes les mesures à 30°C, elle n'est pas visible pour les deux autres températures, comme le montrent des signaux enregistrés à 5°C (Figure 15)¹⁸.

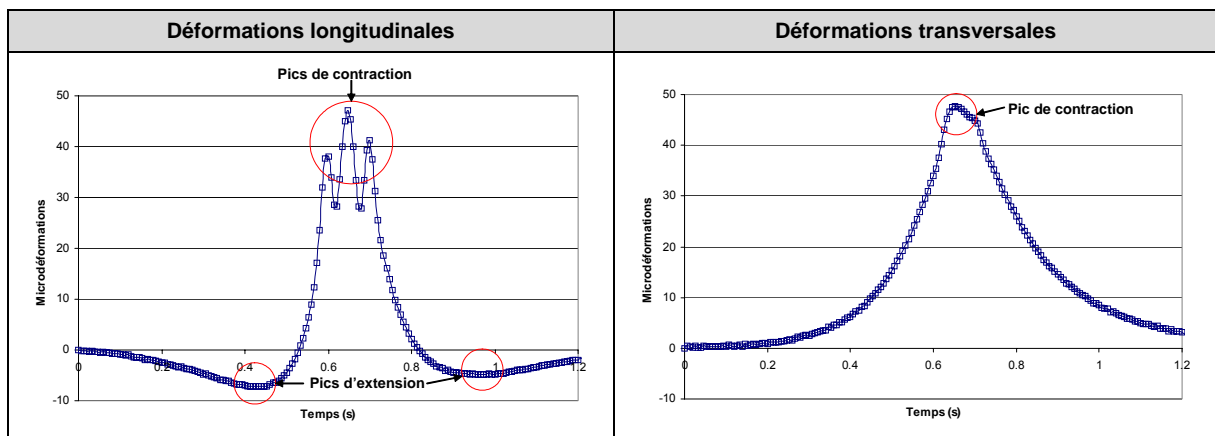


Figure 15 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (5°C)

Ces figures confirment la présence des trois pics sur le signal longitudinal et des variations étonnantes des déformations transversales. En revanche, elles donnent une image moins surprenante des effets de la viscosité avec une extension supérieure avant le passage de la roue et une contraction résiduelle sur le signal transversal.

3.3 Modélisation élastique linéaire des structures de la halle-fosse

Les modélisations sont effectuées à l'aide du logiciel multicouche NOAH (Eckmann 1997), basé sur le modèle de Burmister. Les analyses concernent essentiellement les amplitudes maximales des déformations longitudinales au bas des couches de base, amplitudes servant de critère de dimensionnement des chaussées souples.

La modélisation de la charge est faite conformément aux hypothèses du modèle de Burmister, soit à partir d'une surface circulaire chargée par une pression verticale uniforme. La charge est définie à partir de son intensité et de la pression de contact sur la surface de roulement alors que le rayon de la surface de contact est calculé à partir de ces deux valeurs. La pression est admise égale à celle des pneumatiques. Les pneus simples sont modélisés par une seule surface de contact alors que les

¹⁸ Les signaux mesurés à 15°C sont similaires à ceux de 5°C

jumelages cumulent l'effet de deux surfaces. Dans ce qui suit, cette modélisation de la charge est appelée **modélisation standard**.

La description de la géométrie des structures est donnée au paragraphe 3.1.1 alors que les propriétés élastiques retenues pour les matériaux – modules et coefficients de Poisson - sont spécifiées au paragraphe 3.4.4. Les calculs sont effectués pour des températures de 5°C, 15°C et 30°C, cette variation étant prise en compte par une diminution de la valeur du module élastique avec la température.

3.4 Matériaux mis en place à la halle-fosse et propriétés élastiques

Les structures en vraie grandeur de la halle-fosse se différencient par l'épaisseur et la composition de leur couche de base (cf. § 3.1.1).

3.4.1 Enrobés bitumineux des couches de base et de roulement

Les enrobés bitumineux ont les compositions suivantes :

Tableau 2 : Composition des enrobés bitumineux posés à la halle-fosse

		MR 11	HMT 22s	EME1	EME2
Composition de l'enrobé	Liant / enrobé [%]	5,83	4.13	4.25	5.70
	# 0.09	9,1	6.9	7.0	9.4
	# 2.8	28,4	29.8	30.0	37.8
	# 5.6	32,2	43.7	42.2	54.7
	#11.2	99,0	66.4	66.7	77.1
	# 16.0	100,0	83.3	78.8	89.5
	# 22.4	-	96.5	96.8	97.4
Essai Marshall	HM [%]	6,6	5.8	6.3	2.5
	SM [kN]	6,0	12.7	17.2	15.1
	FM [mm]	3,1	2.3	2.3	4.3
Essai à la PCG	Compacité à 1 giration [%]		78.1	73.2	82.7
	Compacité à 120 girations [%]		94.8	91.7	97.5
	Pente [-]		3.5	3.9	3.1
Liants	Type	Colflex N55	B 80/100	BP Structur 15/25	Mixelf 10/20
	Temp. A&B, °C	55,7	47,8	67,8	64,7
	Indice de pénétration IP	0,2	-0,3	0,5	-0,3
	Point de Fraass, °C	-16	-19	-5	-8
	Pénétration, 1/10mm	50	89	21	18

La méthode française recommande de choisir le module des matériaux bitumineux sur la base d'essais de module complexe sur éprouvette trapézoïdale : les valeurs des modules utilisés dans cette étude sont issues des résultats de cet essai en laboratoire (NF_P98-260-2). Les résultats des essais sont donnés en annexe 8.2.

Le module complexe des enrobés bitumineux dépend de la fréquence et de la température. Si le choix de cette dernière est aisé pour les expériences de la halle-fosse, la définition de la fréquence est plus délicate compte tenu que, contrairement

à celles utilisées lors d'essais en laboratoire, les sollicitations réellement subies par les chaussées ne sont pas périodiques et qu'il n'est donc pas facile de leur associer une fréquence. Pour contourner cette difficulté, il est généralement admis que la fréquence dépend de la vitesse de passage de la charge. Dans le logiciel de formulation PRADO (Francken 1997) édité par le CRR, la relation suivante est utilisée :

$f(\text{Hz}) = 0,45 \cdot V(\text{km/h})$	
--	--

avec :

f = fréquence (Hz)
V = vitesse (km/h)

D'un autre côté, la méthode française de dimensionnement impose d'utiliser la valeur du module complexe à 10 Hz pour les calculs élastiques des contraintes et déformations. Les essais de module complexe réalisés sur les matériaux prélevés à la halle-fosse sont effectués pour des températures comprises entre - 10 et 45°C par intervalles de 5°C et pour des fréquences variant de 8 à 50 Hz. La vitesse théorique de déplacement des charges à la halle-fosse est de 12 km/h, ce qui conduit à une fréquence légèrement inférieure à 6 Hz, compte tenu de la formule du CRR.

3.4.2 Matériaux de la couche de fondation

La couche de fondation est composée de 40 cm de grave I 0/60 selon (SN 670120). Pour les modules des matériaux non liés, la méthode française donne une valeur limite supérieure de 360 MPa. De plus, pour tenir grossièrement compte de la non linéarité de ces matériaux, elle propose de décomposer la couche de fondation en plusieurs couches dont les modules vont en augmentant lorsqu'on approche de la surface. Le comportement de ces matériaux n'étant pas au centre du travail, on se contentera de cette simplification. Signalons toutefois l'existence de modèles permettant une meilleure prise en compte du comportement réel des matériaux non liés (Sweere 1990), mais ces modèles ne sont toutefois généralement pas utilisés pour le dimensionnement.

Une valeur moyenne de 270 MPa pour le module élastique a été évaluée à partir d'essais de plaque. Conformément aux recommandations de la méthode française, cette couche a été divisée en deux sous-couches de 20 cm ayant respectivement des modules de 360 MPa (couche supérieure) et de 180 MPa (couche inférieure). Ces valeurs ont été choisies pour obtenir une moyenne de 270 MPa en tenant compte de la valeur maximale de 360 MPa. Par ailleurs, les valeurs de module obtenues pour ce matériau par calcul inverse à partir de mesures au FWD (Viagroup 1998) sont situées entre 200 et 360 MPa avec une moyenne à 260 MPa, ce qui correspond bien aux valeurs utilisées.

3.4.3 Matériaux du sol de fondation et fond de la fosse

Le sol de fondation mis en place à la halle-fosse est un sable fin 0/2 posé sur le fond en béton de la fosse. Une valeur moyenne pour le module élastique de $E = 90$ MPa a été évaluée à partir d'essais de plaque. Les valeurs de modules obtenues pour ce matériau par calcul inverse à partir de mesures au FWD sont comprises entre 90 et 150 MPa avec une moyenne de 120 MPa.

3.4.4 Propriétés élastiques des matériaux

Conformément à la méthode française, les coefficients de Poisson de tous les matériaux sont admis égaux à 0,35, à l'exception du béton du fond de fosse pour lequel une valeur de 0,20 est retenue.

Les modules des enrobés bitumineux correspondent à la fréquence de 8 Hz et sont définis en fonction de la température. Les autres matériaux présentent des caractéristiques indépendantes de la température. Les valeurs retenues pour les différents matériaux sont récapitulées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Propriétés élastiques des matériaux pour les structures de la halle-fosse

Couches	Matériaux	Epaisseur (cm)	Module à 5°C et 8 Hz (MPa)	Module à 15°C et 8 Hz (MPa)	Module à 30°C et 8 Hz (MPa)	Coefficient de poisson (-)
Couche de roulement	MR 11	3	14'700	8'800	2'700	0,35
Couche de base	HMT 22s	14	12'400	7'100	2'300	0,35
Couche de base	EME1	11	18'600	13'100	6'400	0,35
Couche de base	EME2	7	19'500	13'700	5'900	0,35
Couche de fondation	Grave I (0/60)	2x20	360 (supérieur) et 180 (inférieur)			0,35
Sol de fondation	Sable fin 0/2	143 ou 150	90			0,35
Fond de fosse	Béton	-	20'000			0,20

3.5 Amplitudes maximales des déformations au bas de la couche de base

Les comparaisons ne portent que sur les structures présentant les rigidités extrêmes, soit celles en HMT 22s et en EME2 (cf. Figure 11). Les valeurs maximales des mesures ont été enregistrées au centre de la roue simple et à 15 cm du centre des roues jumelées¹⁹ et les valeurs des modélisations ont naturellement été calculées pour ces mêmes positions.

Les amplitudes maximales des signaux expérimentaux ont été déterminées par analyse automatique des signaux. Les signaux expérimentaux, qui ont été enregistrés pendant le passage de quatre charges (deux allers-retours du simulateur), présentent de légères variations selon la direction de circulation de la charge. Partant de ce constat, une procédure informatisée pour la détermination des amplitudes maximales a été instaurée à l'aide d'un logiciel développé au LAVOC dans le cadre de la contribution suisse au projet COST 333 (Turtschy and Perret 1999). Elle vise à obtenir des valeurs extrêmes (maximum et minimum) des amplitudes. Pour chaque signal, des valeurs spécifiques ont été automatiquement extraites (Figure 16).

¹⁹ Soit approximativement au centre d'une des roues jumelées

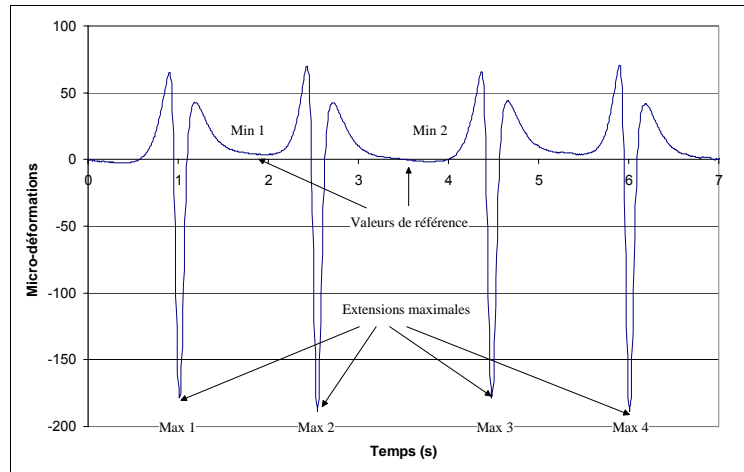


Figure 16 : Détermination des amplitudes de déformations longitudinales à partir des signaux expérimentaux de la halle-fosse

A partir des quatre extensions maximales (Max 1 à 4) et des deux valeurs de référence (Min 1 et 2), il est possible de définir des amplitudes maximales et minimales en utilisant les valeurs extrêmes obtenues pour chaque position.

Dans un premier temps, la qualité globale des modélisations sera évaluée en comparant l'ensemble des conditions de charge et de température envisagée. Pour les conditions de chargement, il est plus intéressant d'étudier leur influence en terme de variation relative puisque les durées de vie des chaussées bitumineuses sont déterminées à partir de loi de puissance appliquées aux amplitudes maximales des déformations au bas des couches. L'analyse détaillée de ces résultats a été effectuée dans le cadre d'un travail de thèse (Perret 2003).

3.5.1 Tous cas de charge et de température confondus

La comparaison des résultats pour toutes les conditions de chargement et de température est faite en représentant en abscisse les résultats des modélisations et en ordonnée ceux des mesures, pour lesquels sont données les amplitudes maximales et minimales (Figure 17).

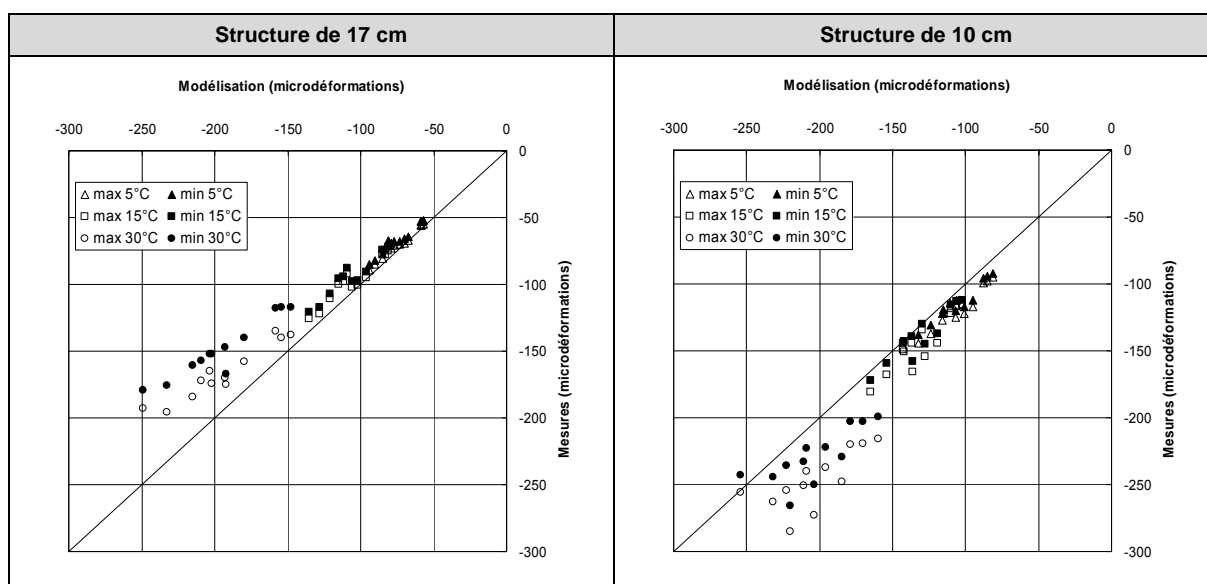


Figure 17 : Comparaison des déformations longitudinales maximales calculées ou mesurées pour tous les cas de charge (Perret 2003)

Ces figures montrent que la situation diffère selon la structure envisagée. Dans le cas le plus rigide (17 cm), les résultats expérimentaux sont systématiquement inférieurs à ceux des modélisations. La tendance est totalement inverse sur l'autre structure, puisque les résultats expérimentaux sont supérieurs à ceux des modélisations. Par ailleurs, les écarts augmentent avec la température pour les deux structures, les écarts les plus importants étant de l'ordre de 50 à 60 microdéformations pour les mesures à 30°C.

Plus que l'exactitude des valeurs absolues des déformations, ce sont les écarts relatifs entre les déformations calculées et celles mesurées qui peuvent conduire à des erreurs conséquentes de l'évaluation des durées de vie et des trafics équivalents. Pour l'ensemble des situations envisagées, les résultats des modélisations sont compris dans une fourchette de l'ordre de 35 % autour des valeurs calculées²⁰. Il convient encore de signaler que cette fourchette est réduite à 25 % si on admet la mesure la plus proche pour chaque structure, (c'est-à-dire la mesure maximale pour la structure de 17 cm et la valeur minimale pour la structure de 10 cm) et à 10 % si on ne tient pas compte des mesures à 30°C.

3.5.2 Effet de la variation de l'intensité de la charge

L'effet de la variation de l'intensité de la charge est évalué à partir des ratios entre les déformations obtenues pour une charge de 11,5 to et celles obtenues pour une charge de 8 to (augmentation de 44 %). Ces ratios sont calculés de la façon suivante :

$r_{\text{charge}} = \frac{\varepsilon_{11,5\text{to}}}{\varepsilon_{8\text{to}}}$	Eq. 8
--	-------

avec :

²⁰ Avec une loi de fatigue utilisant une puissance 5, ces écarts de 35 % peuvent conduire à des rapports de durées de vie (en essieux équivalents) allant de 1 à $(1,35)^5 = 4.5$

r_{charge} = ratio des déformations pour la charge

$\varepsilon_{11,5 \text{ to}}$ = déformation pour une charge de 11,5 to

$\varepsilon_{8 \text{ to}}$ = déformation pour une charge de 8 to

Les ratios des mesures sont calculés sur la base des amplitudes maximales des mesures (Tableau 4 et Tableau 5).

Tableau 4 : Ratios des déformations pour la charge - structure de 17 cm

	Roues simples						Roues jumelées					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,21	1,27	1,24	1,28	1,27	1,29	1,30	1,35	1,32	1,36	1,26	1,36
15°C	1,17	1,25	1,21	1,26	1,23	1,27	1,23	1,34	1,25	1,35	1,29	1,35
30°C	1,16	1,19	1,12	1,21	1,17	1,22	1,23	1,30	1,24	1,31	1,27	1,32

Tableau 5 : Ratios des déformations pour la charge - structure de 10 cm

	Roues simples						Roues jumelées					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,09	1,22	1,13	1,23	1,15	1,23	1,22	1,30	1,21	1,30	1,24	1,31
15°C	1,05	1,20	1,09	1,21	1,09	1,21	1,16	1,28	1,23	1,29	1,22	1,29
30°C	0,97	1,13	0,96	1,14	0,90	1,15	1,10	1,23	1,14	1,24	1,16	1,25

Les ratios des déformations sont toujours inférieurs à celui des charges (1,44). L'effet de la variation de la charge est lié à la rigidité de la structure considérée : plus cette rigidité augmente, plus l'effet de la charge est marqué. Les ratios des roues jumelées sont supérieurs à ceux des roues simples. Pour juger globalement de la concordance entre mesures et modélisations, l'ensemble des résultats est représenté avec en ordonnée les ratios des mesures et en abscisse ceux des modélisations (Figure 18).

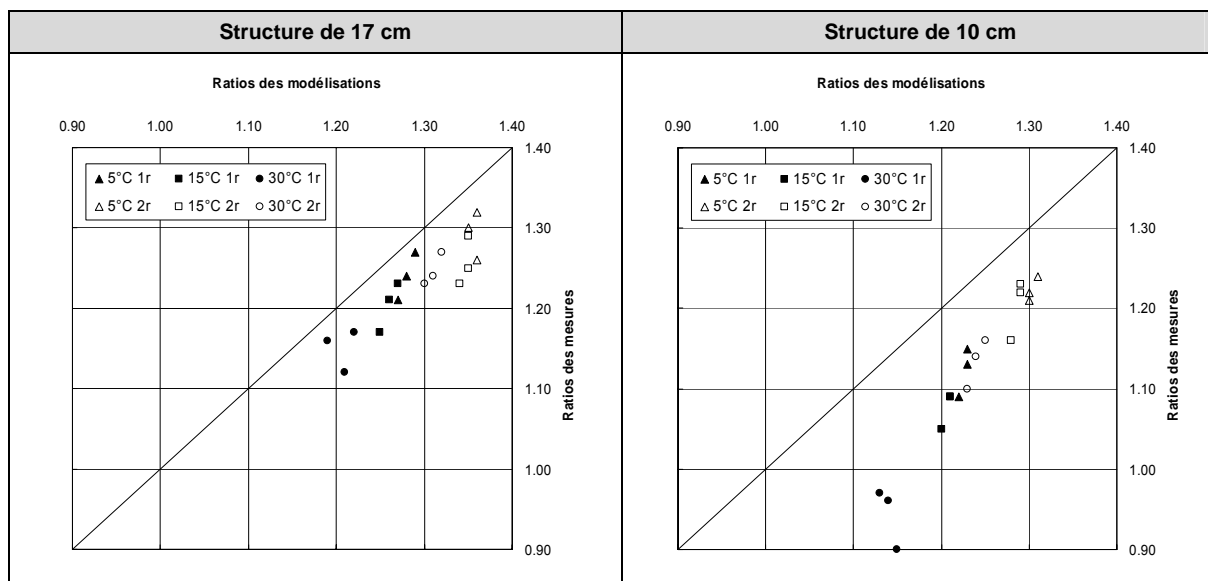


Figure 18 : Comparaison des ratios des déformations pour la charge (Perret 2003)

Les ratios obtenus par modélisation sont toujours supérieurs à ceux des mesures et le contraste est plus marqué sur la structure fine. Ces résultats montrent une claire relation de proportionnalité entre les résultats des mesures et ceux des modélisations. Les conséquences, d'un point de vue qualitatif, d'une augmentation de l'intensité de la charge ont été synthétisées en signalant les éventuelles interactions avec d'autres paramètres (Tableau 6).

Tableau 6 : Synthèse qualitative des conséquences d'une augmentation de l'intensité de la charge

Paramètres	Mesures	Modélisations
Général	Augmentation des déformations avec l'augmentation de la charge ²¹	Idem, mais pour tous les cas de charge
	Ratios des déformations inférieures au ratio des charges	Idem, mais les augmentations relatives sont toujours supérieures à celles obtenues à partir des mesures
Pression	Influence peu marquée sur les ratios des déformations.	Idem
	Pas de tendance décelable	Très faible augmentation des ratios des déformations lorsque la pression augmente
Type de roue	Les ratios des déformations sont plus importants pour des roues jumelées	Idem
Température	Les ratios des déformations augmentent lorsque la température diminue	Idem
Structure	Les ratios des déformations sont plus importants pour la structure la plus épaisse	Idem
	L'augmentation de la charge peut se traduire par une diminution des déformations maximales pour une structure de faible rigidité (mince à haute température)	L'augmentation de la charge conduit toujours à des augmentations des déformations

²¹ Seules les mesures à 30°C pour des roues simples sur la structure de 10 cm contredisent cette tendance générale

3.5.3 Effet de la variation de la pression de gonflage

L'effet de la variation de la pression est évalué à partir des ratios entre les déformations obtenues pour différentes pressions de gonflage. Deux variations ont été retenues, de 6 à 7 bars et de 6 à 8 bars, correspondant à des augmentations relatives et respectives de 17 et 33 %. Ces ratios sont calculés de la façon suivante :

$$r_{\text{pression}} = \frac{\varepsilon_{i\text{bars}}}{\varepsilon_{6\text{bars}}} \quad \text{Eq. 9}$$

avec :

- r_{pression} = ratio des déformations pour la pression
- $\varepsilon_{i\text{bars}}$ = déformation pour une pression de i bars, i = 7 ou 8
- $\varepsilon_{6\text{bars}}$ = déformation pour une pression de 6 bars

Les ratios des mesures sont calculés sur la base des amplitudes maximales (Tableau 7 et Tableau 8).

Tableau 7 : Ratios des déformations pour la pression - structure de 17 cm

		Roues simples				Roues jumelées			
		11,5 to		8 to		11,5 to		8 to	
		6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
5°C	mes.	1,06	1,11	1,03	1,06	1,03	0,99	1,01	1,02
	mod.	1,06	1,10	1,05	1,09	1,03	1,05	1,02	1,04
15°C	mes.	1,10	1,13	1,06	1,07	1,06	1,09	1,05	1,04
	mod.	1,06	1,12	1,05	1,10	1,03	1,06	1,03	1,05
30°C	mes.	1,07	1,05	1,11	1,04	1,02	1,01	1,01	0,98
	mod.	1,09	1,16	1,07	1,13	1,05	1,08	1,04	1,07

Tableau 8 : Ratios des déformations pour la pression - structure de 10 cm

		Roues simples				Roues jumelées			
		11,5 to		8 to		11,5 to		8 to	
		6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
5°C	mes.	1,08	1,14	1,04	1,07	1,02	1,06	1,03	1,04
	mod.	1,07	1,14	1,07	1,13	1,05	1,09	1,04	1,08
15°C	mes.	1,11	1,20	1,07	1,16	1,07	1,11	1,01	1,05
	mod.	1,08	1,16	1,08	1,14	1,05	1,10	1,05	1,09
30°C	mes.	1,09	1,07	1,10	1,15	1,06	1,07	1,01	1,02
	mod.	1,11	1,22	1,10	1,19	1,07	1,14	1,06	1,12

Les ratios des déformations sont toujours inférieurs à ceux des pressions. L'effet de la variation de la pression est plus marqué pour des roues simples que pour des roues jumelées. Il est également légèrement moins marqué pour la structure la plus

rigide²². Enfin, les ratios sont dans l'ensemble légèrement plus importants pour les fortes charges. Pour juger globalement de la concordance entre mesures et modélisations, l'ensemble des résultats est représenté selon le même principe que pour la charge, soit avec en ordonnée les résultats des mesures et en abscisse ceux des modélisations (Figure 19).

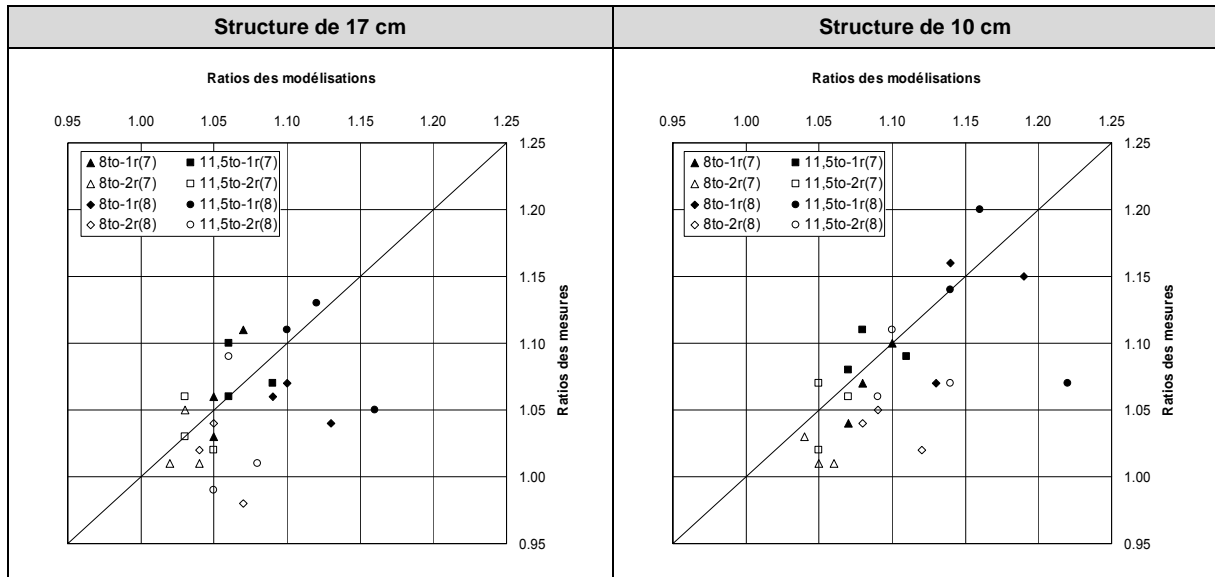


Figure 19 : Comparaison des ratios des déformations pour la pression (Perret 2003)

Contrairement à ceux pour la charge, les ratios des mesures peuvent aussi bien être surestimés que sous-estimés par ceux tirés des modélisations. Les résultats sont sensiblement plus dispersés, mais les ordres de grandeur concordent. Les conséquences, d'un point de vue qualitatif, d'une augmentation de la pression de gonflage ont été synthétisées en signalant les éventuelles interactions avec d'autres paramètres (Tableau 9).

²² Dans ce dernier cas, les mesures ne confirment pas de façon décisive les modélisations

Tableau 9 : Synthèse qualitative des conséquences d'une augmentation de la pression de gonflage

Paramètres	Mesures	Modélisations
Général	Augmentation des déformations avec l'augmentation de la pression ²³	Idem, mais pour tous les cas de charge. Les augmentations sont en moyenne supérieures à celles obtenues à partir des mesures
	Augmentation relative des déformations inférieures à l'augmentation relative de la pression	Idem
Charge	Influence peu marquée sur les variations relatives des déformations.	Idem
	Pas de tendance décelable	Très faible augmentation des variations relatives des déformations lorsque la charge augmente
Type de roue	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour des roues simples	Idem
Température	Peu d'influence sur les variations relatives des déformations.	Idem
	Pas de tendance	Très faible augmentation des variations relatives des déformations lorsque la température augmente
Structure	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour la structure la plus fine	Idem

3.5.4 Effet du type roues

L'effet du type de roues utilisées est évalué à partir des ratios des déformations maximales selon que la charge est appliquée sur des roues simples ou sur des roues jumelées. Ces ratios sont calculés de la façon suivante :

$r_{\text{roues}} = \frac{\varepsilon_{1\text{roue}}}{\varepsilon_{2\text{roues}}}$	Eq. 10
---	--------

avec :

- r_{roues} = ratio des déformations pour le type de roues
- $\varepsilon_{1\text{roue}}$ = déformation pour une charge appliquée sur des roues simples
- $\varepsilon_{2\text{roues}}$ = déformation pour une charge appliquée sur des roues jumelées

Les ratios des mesures sont calculés sur la base des amplitudes maximales (Tableau 10 et Tableau 11).

²³ Deux mesures à 30°C pour des roues jumelées sur la structure de 17 cm contredisent cette tendance générale.

Tableau 10 : Ratios des déformations pour le type de roue - structure de 17 cm

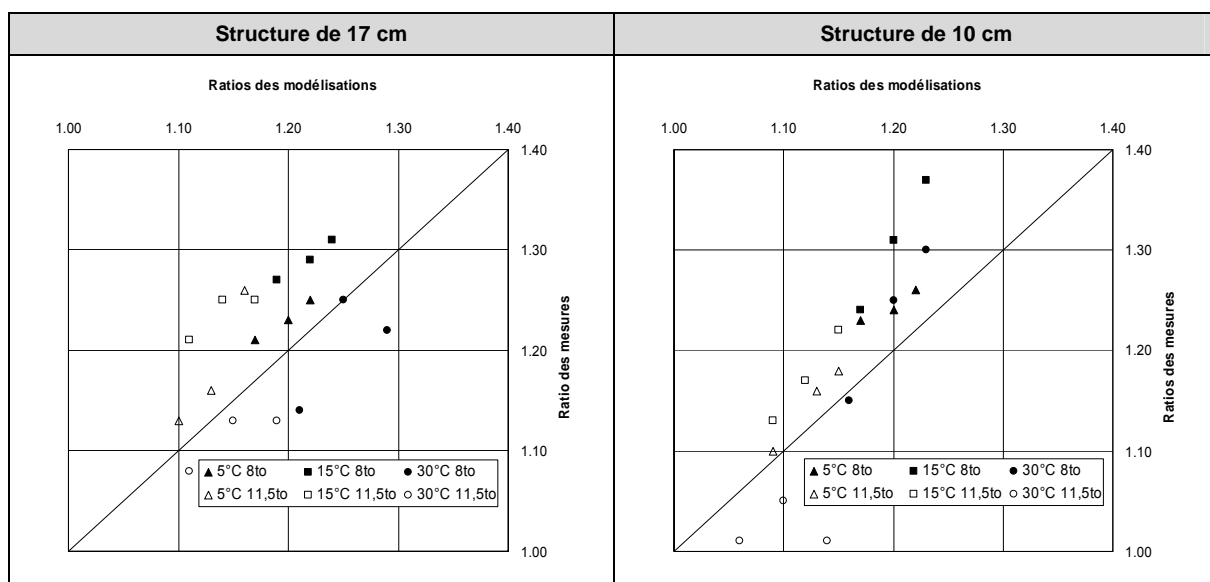
	11,5 to						8 to					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,13	1,10	1,16	1,13	1,26	1,16	1,21	1,17	1,23	1,20	1,25	1,22
15°C	1,21	1,11	1,25	1,14	1,25	1,17	1,27	1,19	1,29	1,22	1,31	1,24
30°C	1,08	1,11	1,13	1,15	1,13	1,19	1,14	1,21	1,25	1,25	1,22	1,29

Tableau 11 : Ratios des déformations pour le type de roue - structure de 10 cm

	11,5 to						8 to					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,10	1,09	1,16	1,13	1,18	1,15	1,23	1,17	1,24	1,20	1,26	1,22
15°C	1,13	1,09	1,17	1,12	1,22	1,15	1,24	1,17	1,31	1,20	1,37	1,23
30°C	1,01	1,06	1,05	1,10	1,01	1,14	1,15	1,16	1,25	1,20	1,30	1,23

Le passage de roues jumelées à des roues simples engendre des augmentations sensibles des déformations maximales. Les rapports des déformations dépendent de l'intensité de la charge : les augmentations sont de l'ordre de 10 à 20 % pour une charge de 11,5 to et de 20 à 30 % pour une de 8 to. Les modélisations montrent une légère augmentation des rapports des déformations avec la pression de gonflage. En revanche, les effets de la température et du type de structure ne sont pas clairement définis et semblent peu importants.

La concordance des résultats des mesures et de ceux des modélisations est toujours effectuée selon le même principe, soit avec en ordonnée les résultats de mesures et en abscisse ceux des modélisations (Figure 20).

**Figure 20 : Comparaison des ratios des déformations pour le type de roues (Perret 2003)**

Dans l'ensemble, les modélisations sous-estiment plutôt les variations par rapport aux mesures puisque la majorité des points sont situés au-dessus de la ligne d'égalité. Elles fournissent néanmoins une très bonne estimation des ordres de

grandeur des variations obtenues à partir des mesures. Les conséquences, d'un point de vue qualitatif, de l'utilisation des différents types de roues ont été synthétisées en signalant les éventuelles interactions avec d'autres paramètres (Tableau 12).

Tableau 12 : Synthèse qualitative des conséquences de l'utilisation de différents types de roues

Paramètres	Mesures	Modélisations
Général	Augmentation des déformations avec des roues simples	Idem. Les augmentations sont généralement inférieures à celles obtenues à partir des mesures
Charge	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour la charge la plus faible	Idem
Pression	Les variations relatives des déformations augmentent lorsque la pression augmente ²⁴	Idem, mais pour tous les cas de charge
Température	Peu d'influence sur les variations relatives des déformations	Idem
	Pas de tendance	Très faible augmentation des variations relatives des déformations lorsque la température augmente
Structure	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour la structure la plus fine	Idem

3.5.5 Evaluation statistique de l'influence des paramètres de charge

S'il est évident que les deux paramètres influençant le plus les déformations sont la température et l'épaisseur des couches bitumineuses, il est plus délicat d'évaluer le poids²⁵ de chacun des paramètres de charge (intensité, pression et type de roues) et les éventuelles interactions pouvant exister entre eux.

Diverses méthodes statistiques permettent de déterminer quels sont les paramètres influençant le plus les résultats d'une expérience (Schimmerling, Sisson et al. 1998). C'est notamment le cas de la méthode d'analyse de variances, la méthode ANOVA (Morgenthaler 1997). Cette méthode permet d'obtenir un modèle statistique incluant des paramètres expérimentaux pour une série de résultats. Il est également possible d'évaluer les interactions entre ces paramètres expérimentaux.

Le modèle comporte un terme constant et des coefficients correspondant à chaque paramètre (ou à leur interaction) qui font varier les résultats autour du terme constant selon les valeurs prises par les paramètres. Un modèle incluant deux paramètres²⁶ expérimentaux sans interaction présente la forme suivante :

$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$	Eq. 11
--	--------

avec :

²⁴ Seules deux mesures à 30°C avec une pression de 8 bars contredisent cette tendance

²⁵ Le terme de poids qualifie l'importance relative d'un paramètre donné vis-à-vis d'autres paramètres

²⁶ L'utilisation du terme paramètres dans le cadre de ce chapitre est propre à notre étude et ne correspond pas à celle utilisée en statistique Morgenthaler, S. (1997)

y_{ij}	= résultat du modèle pour les paramètres i et j
μ	= moyenne globale (terme constant)
α_i	= effets du premier paramètre pour sa valeur i
β_j	= effets du second paramètre pour sa valeur j
ε_{ij}	= variables aléatoires non corrélées de moyenne nulle et de variance constante

Partant d'un tel modèle, il est possible d'évaluer l'importance de chacun des paramètres ou de leur interaction sur les résultats expérimentaux. En d'autres termes, il est possible de déterminer quels sont les paramètres qui n'influencent pas de façon significative les résultats analysés.

Des analyses ANOVA ont été effectuées tant sur les résultats des mesures que sur ceux des modélisations. Une première analyse a été faite sur toutes les observations²⁷ en incluant tous les paramètres²⁸. Compte tenu de ces premiers résultats, une seconde analyse séparant les observations par structure et par température a été effectuée.

3.5.5.1 Analyse ANOVA globale

Pour cette première analyse, toutes les observations ont été analysées en tenant compte des cinq paramètres suivants :

- température
- type de structure
- intensité
- pression
- type de roues

Des interactions simples (entre deux paramètres) ont été supposées entre :

- les paramètres de charge (3 interactions)
- la température et chacun des paramètres de charges (3 interactions)
- la structure et chacun des paramètres de charge (3 interactions).

Les coefficients des deux modèles statistiques correspondant respectivement aux mesures et aux modélisations sont donc au nombre de 15, y compris le terme constant. La qualité des modèles est évaluée à partir des résidus²⁹ des modèles. Les analyses ANOVA sont fiables si les résidus suivent une distribution normale. Les résidus des deux modèles ont été testés et leur distribution peut être admise comme normale. Ceci signifie qu'il est possible d'utiliser les résultats de l'analyse ANOVA.

²⁷ On entend par observations tous les résultats provenant soit des mesures soit des modélisations

²⁸ Trois températures, deux structures et six cas de charge

²⁹ Les résidus sont les écarts entre les observations et les valeurs du modèle statistique pour un cas de charge donné

De manière générale, un test statistique³⁰ a été effectué. Il confirme que pour des paramètres fixés, la mesure et la modélisation ne sont pas significativement différents au niveau des moyennes. Toutefois, il convient de se méfier de ce résultat qui ne signifie pas que les mesures et les modélisations sont concordantes pour chaque cas de charge, mais uniquement au niveau des moyennes. Dans le cas présent, cette concordance moyenne s'explique par le fait que les mesures sur la structure de 17 cm sont systématiquement inférieures aux modélisations alors que la situation est inverse pour la structure de 10 cm (cf. Figure 17, page 34).

La nécessité de prendre ou non en compte des paramètres (ou leurs interactions) peut être évaluée par un test statistique. L'hypothèse testée pour chaque paramètre est : "le modèle peut se passer de ce paramètre", c'est à dire, ce paramètre n'est pas important pour expliquer la variation des observations. On rejette l'hypothèse lorsque la probabilité (p-valeur) du test est inférieure à 5%. Les paramètres avec une probabilité supérieure à 5% (en gras) peuvent donc être négligés³¹.

Tableau 13 : Importance des paramètres et de leurs interactions dans le modèle (p-valeur)

Paramètres	Mesures	Modélisations
Température	0%	0%
Structure	0%	0%
Intensité	0%	0%
Pression	23%	80%
Roue	0%	0%
Intensité Pression (I-P)	36%	66%
Intensité Roue (I-R)	49%	64%
Roue Pression (R-P)	1%	0%
Température Intensité (T-I)	95%	3%
Température Pression (T-P)	94%	72%
Température Roue (T-R)	62%	6%
Structure Intensité (S-I)	32%	78%
Structure Pression (S-R)	4%	1%
Structure Roue (S-R)	12%	3%

Ces résultats mettent nettement en évidence que la température, la structure, l'intensité et le type de roue sont les paramètres les plus importants. La pression intervient en interaction avec le type de roues et avec la structure.

On note encore que les modélisations retiennent deux interactions que les mesures ne confirment pas, soit entre la température et l'intensité et entre la structure et le type de roue. Il semble logique que les résultats des modélisations créent plus d'interactions que les mesures, puisque ces résultats sont à priori moins aléatoires que ceux des mesures.

³⁰ Wilcoxon, test non paramétrique ne se basant pas sur une hypothèse de normalité des données

³¹ Ce qui signifie qu'il y a une probabilité de 5% d'avoir rejeté faussement l'hypothèse

3.5.5.2 Analyse ANOVA par structure et par température

Puisque ce travail se focalise essentiellement sur les conditions de charge, des analyses complémentaires n'utilisant que les paramètres de charge ont été effectuées. Compte tenu des résultats de l'analyse ANOVA globale, les observations ont été groupées par structure et par température. Pour ces analyses, le modèle choisi inclut l'effet des trois paramètres de charge étudiés et de leurs interactions. Sept coefficients sont donc nécessaires pour chacun de ces modèles :

- 1 coefficient constant correspondant à la valeur moyenne des déformations
- 3 coefficients correspondant à l'effet de chacun des paramètres
- 3 coefficients correspondant aux interactions entre les paramètres

Les modèles ont de nouveau été testés à partir de la répartition des résidus. Toutes les distributions des résidus peuvent être admises comme normales, à l'exception de celle du modèle de la structure de 10 cm à 30°C pour les résultats de modélisations. L'analyse ANOVA ne peut pas être appliquée pour ce modèle.

La nécessité de prendre ou non en compte des paramètres ou leurs interactions est à nouveau évaluée par la probabilité d'un test statistique (p-valeur). Les paramètres présentant une probabilité supérieure à 5 % (en gras) peuvent être négligés (Tableau 14).

Tableau 14 : Importance des paramètres et de leurs interactions dans les modèles par structure et par température (p-valeur)

Paramètres	Structure 17 cm						Structure 10 cm					
	5°C		15°C		30°C		5°C		15°C		30°C	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
Intensité	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	51%	⁻³²
Pression	25%	0%	1%	0%	4%	0%	0%	1%	1%	1%	33%	-
Roues	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	54%	-
I-P	75%	8%	6%	7%	28%	6%	4%	10%	4%	6%	28%	-
I-R	92%	9%	60%	6%	4%	3%	9%	40%	19%	29%	41%	-
P-R	27%	2%	8%	2%	6%	2%	0%	0%	0%	0%	14%	-

Ces résultats montrent qu'aucun des paramètres de charge ne peut être négligé pour la détermination des déformations maximales au bas de la couche de base. Seuls les deux résultats des mesures correspondant au cas des rigidités extrêmes (structure de 17 cm à 5°C et structure de 10 cm à 30°C) indiquent que la pression peut être négligée. Parmi ces paramètres, ce sont les probabilités en rapport avec la pression qui sont les plus élevées. Cela signifie que la pression est probablement le paramètre de charge le moins influent. Concernant les interactions entre les paramètres de charge et de façon générale, seules les interactions entre la pression et le type de roue semblent importantes. Pour la structure de 10 cm, les probabilités obtenues pour la température de 30°C montrent qu'aucun paramètre n'est déterminant. Ces résultats ne sont pas pris en compte par la suite.

³² Analyse ANOVA pas fiable

A partir des résultats obtenus pour les coefficients des modèles, leur poids a été calculé (Tableau 15).

Tableau 15 : Poids des coefficients des paramètres et des interactions

Paramètres	Structure 17 cm						Structure 10 cm					
	5°C		15°C		30°C		5°C		15°C		30°C	
	Mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
Intensité	39%	46%	30%	42%	32%	34%	20%	31%	13%	28%	-	-
Pression	13%	18%	23%	19%	17%	24%	29%	22%	29%	21%	-	-
Roues	31%	25%	33%	26%	26%	26%	7%	6%	8%	6%	-	-
I-P	5%	4%	7%	4%	6%	5%	9%	5%	10%	5%	-	-
I-R	0%	1%	0%	2%	5%	3%	2%	1%	1%	1%	-	-
P-R	12%	7%	7%	7%	14%	9%	34%	36%	39%	38%	-	-

Ces résultats permettent d'établir une sorte de « classement » des paramètres et de leurs interactions (Tableau 16).

Tableau 16 : « Classement » des paramètres et des interactions

Paramètres	Structure 17 cm						Structure 10 cm					
	5°C		15°C		30°C		5°C		15°C		30°C	
	Mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
Intensité	1	1	2	1	1	1	3	2	3	2	-	-
Pression	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	-	-
Roues	2	2	1	2	2	2	5	4	5	4	-	-
I-P	5	5	4	4	5	5	4	5	4	5	-	-
I-R	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-	-
P-R	4	4	5	5	4	4	1	1	1	1	-	-

Les classements basés sur les résultats des mesures sont similaires à ceux obtenus à partir des modélisations. Ces classements présentent en revanche une nette différence selon la structure. Pour la structure de 17 cm, les paramètres agissent essentiellement de façon indépendante, puisqu'ils occupent systématiquement les trois premières positions, la pression venant toujours en troisième. En revanche sur la structure de 10 cm, il existe une claire interaction entre la pression et le type de roue qui apparaît systématiquement en première position. Cette forte influence de cette interaction se fait au détriment du type de roue, ce qui signifie que ce paramètre demeure important.

Il est à souligner que tous les résultats statistiques présentés ici confirment les commentaires qualitatifs effectués précédemment (cf. Tableau 6 page 36, Tableau 9 page 39 et Tableau 12 page 41).

3.5.6 Synthèse des résultats pour les amplitudes des déformations longitudinales

Pour l'intensité de la charge, il est possible de faire les observations suivantes :

- l'augmentation de l'intensité de la charge conduit généralement³³ à une augmentation des déformations longitudinales
- l'augmentation relative des déformations est toujours inférieure à l'augmentation relative de la charge
- une modélisation simple de la charge, surface circulaire uniformément chargée, donne des tendances similaires à celles obtenues à partir de mesures expérimentales
- les ratios des déformations pour la charge (cf. Eq. 8, page 34) obtenus par modélisation sont toujours supérieurs à ceux tirés des mesures expérimentales.

Pour la pression des pneus, on constate les faits suivants :

- l'augmentation de la pression de gonflage conduit généralement à une augmentation des déformations longitudinales³⁴
- l'augmentation relative des déformations est toujours inférieure à l'augmentation relative de la pression
- une modélisation simple de la charge, surface circulaire uniformément chargée, donne des tendances qui ne sont pas systématiquement confirmées par les mesures expérimentales
- les ratios des déformations pour la pression (cf. Eq. 9, page 37) obtenus par modélisation sont généralement supérieurs à ceux tirés des mesures expérimentales.

Pour le type de roues, on remarque que :

- l'utilisation de roues simples à la place de roues jumelées conduit à une augmentation des déformations longitudinales
- une modélisation simple de la charge, surface circulaire uniformément chargée, donne des tendances similaires à celles obtenues à partir de mesures expérimentales
- une modélisation simple de la charge permet d'évaluer quantitativement l'effet d'un changement de la configuration des roues sur les déformations longitudinales maximales
- les ratios des déformations pour le type de roues (cf. Eq. 10, page 39) obtenus par modélisation sont en moyenne légèrement inférieurs à ceux tirés des mesures.

De plus, sur la base des observations qualitatives et des analyses statistiques, il est possible d'effectuer un classement de l'influence relative des paramètres de charge sur les déformations longitudinales au bas de la couche de base :

1. intensité de la charge

³³ Il faut rappeler que les mesures à 30°C pour des roues simples contredisent cette tendance générale

³⁴ La tendance est générale selon les modélisations

2. type de roue
3. pression

Ce classement est évidemment valable pour les variations de ces paramètres utilisées dans le cadre de cette étude, notamment en ce qui concerne l'effet de l'intensité de la charge et celle de la pression de gonflage. En revanche, il est indépendant de la température et il faut noter que l'effet de la pression est à étudier en interaction avec le type de roue.

3.6 Signaux de déformation au bas de la couche de base

3.6.1 Effets des conditions de chargement sur les résultats expérimentaux

Les signaux représentés sont composés de 200 points de mesures, pris de part et d'autre de l'amplitude maximale de déformation. Les valeurs de la déformation du premier point de mesure sont admises comme étant égales à zéro pour tous les signaux. Latéralement, les mesures correspondent au centre du pneu pour les roues simples et à 20 cm par rapport au centre des roues jumelées. Par ailleurs, la bonne concordance observée entre les mesures et les modélisations pour la répartition latérale permet la comparaison de signaux pour une position transversale définie, malgré les incertitudes concernant la position exacte de la charge par rapport à la jauge de mesure. Afin de donner une vision globale de tous les cas de charge étudiés, les signaux ont été superposés pour les trois températures et pour les deux structures (Figure 21 à Figure 26).

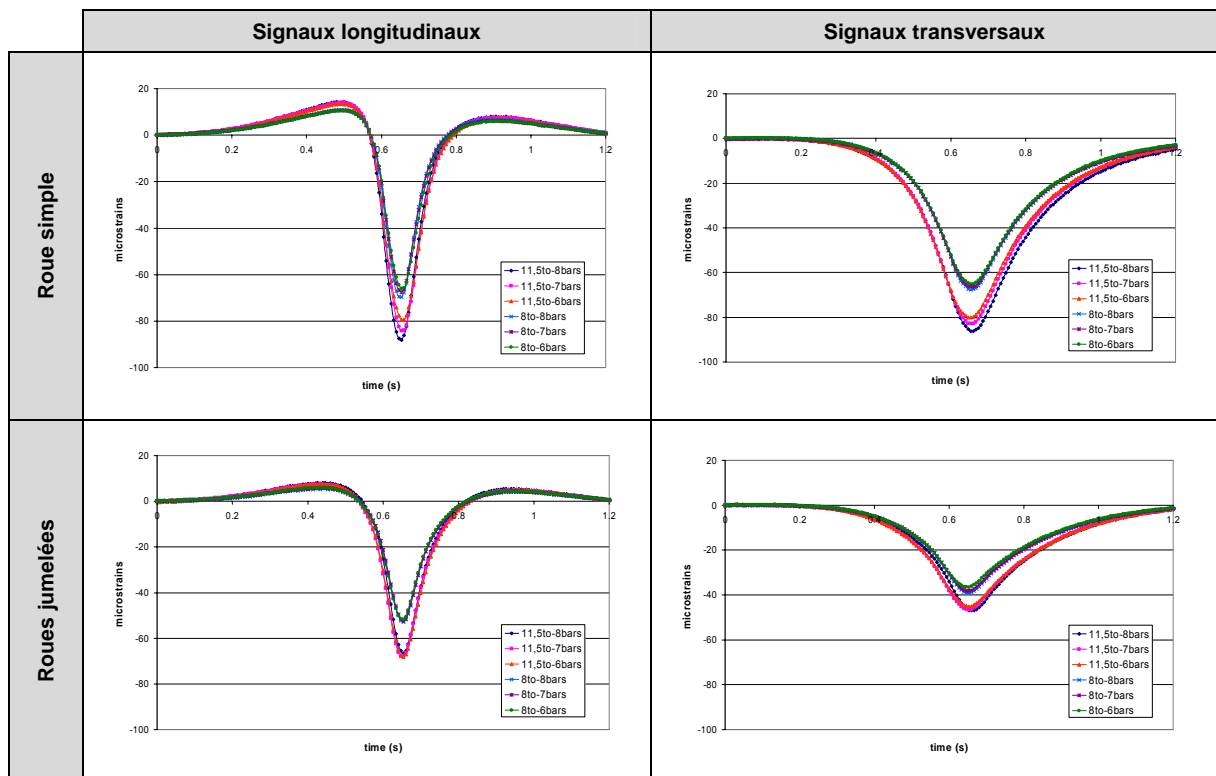


Figure 21 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 5°C - structure de 17 cm

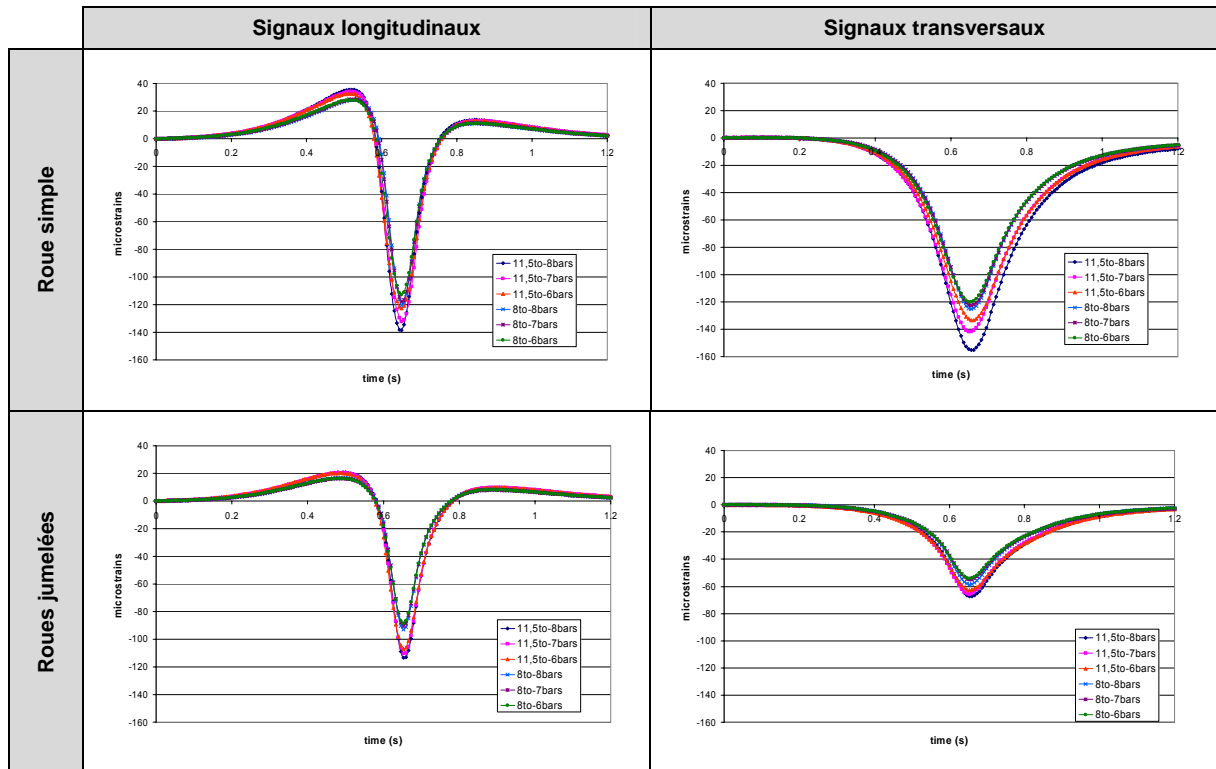


Figure 22 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 5°C - structure de 10 cm

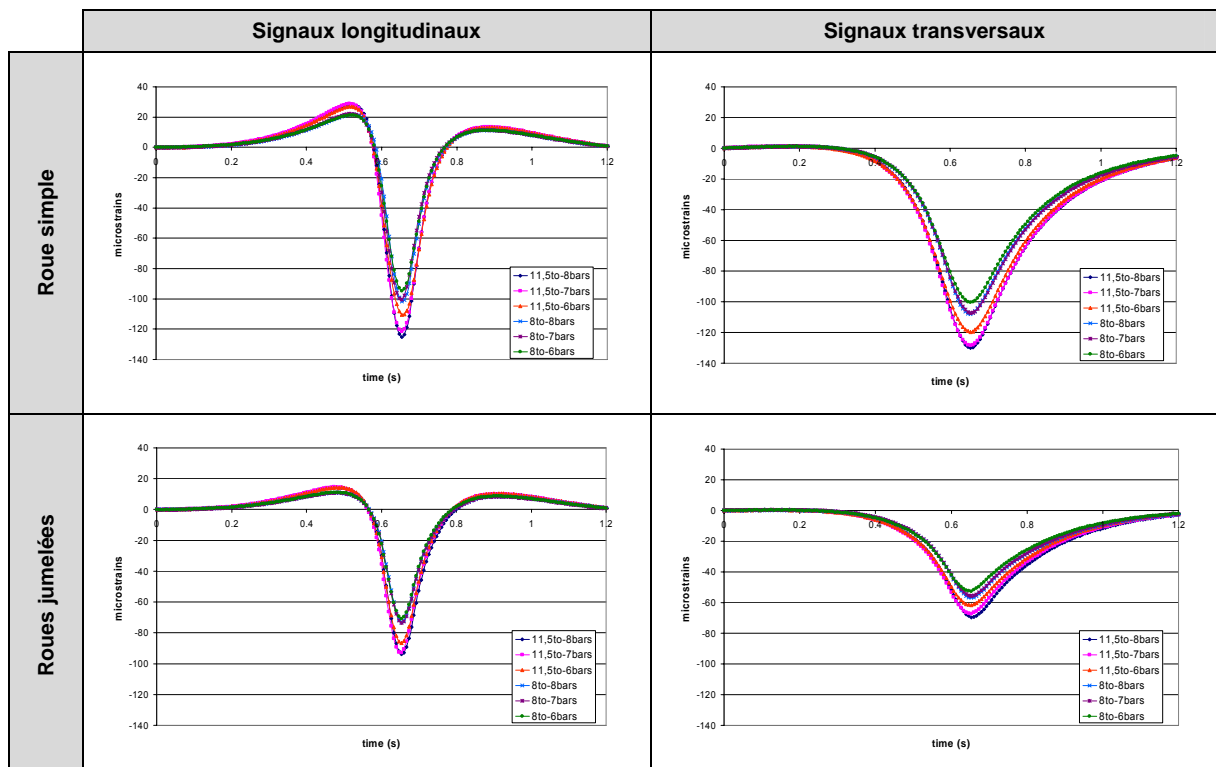


Figure 23 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 15°C - structure de 17 cm

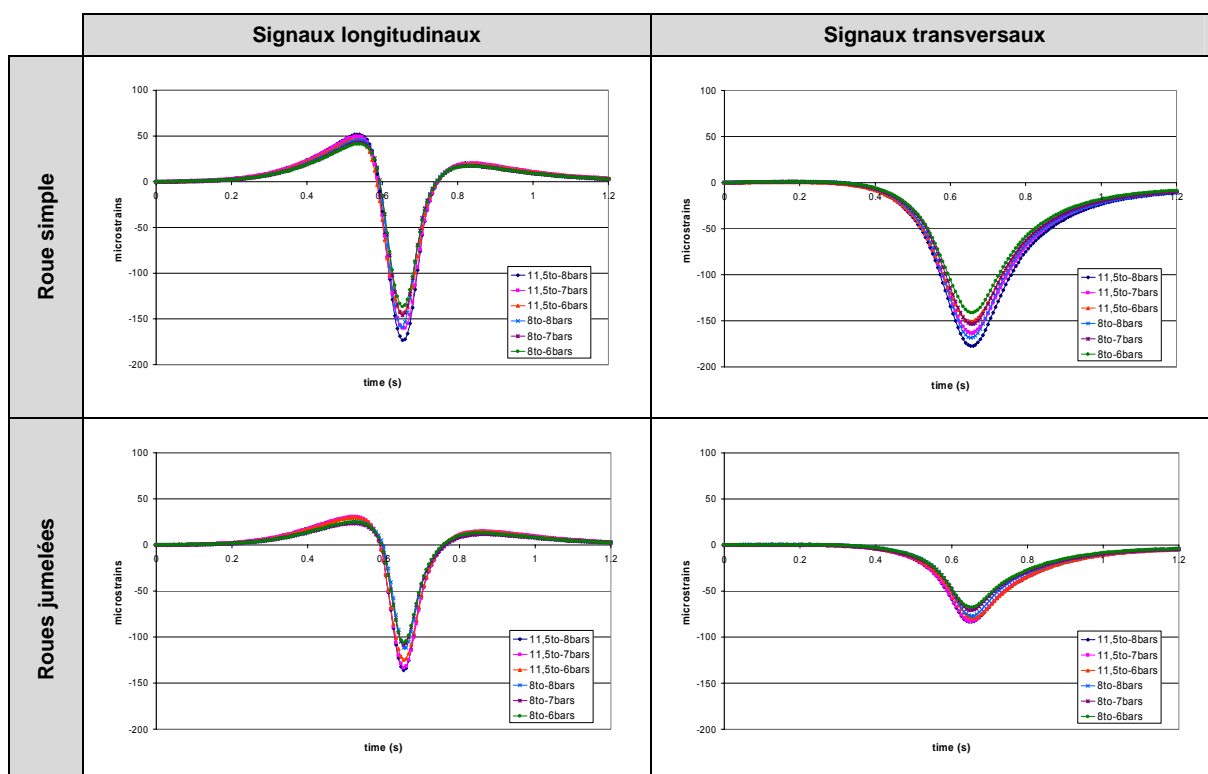


Figure 24 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 15°C - structure de 10 cm

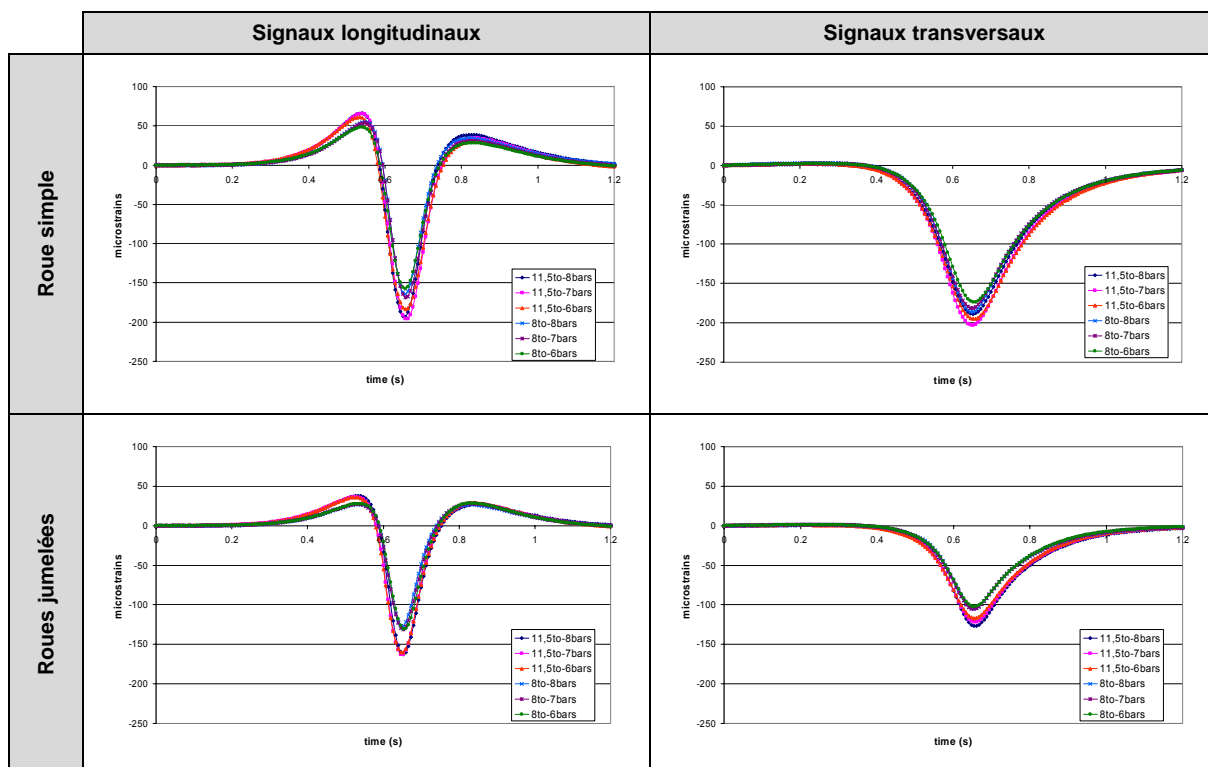


Figure 25 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 30°C - structure de 17 cm

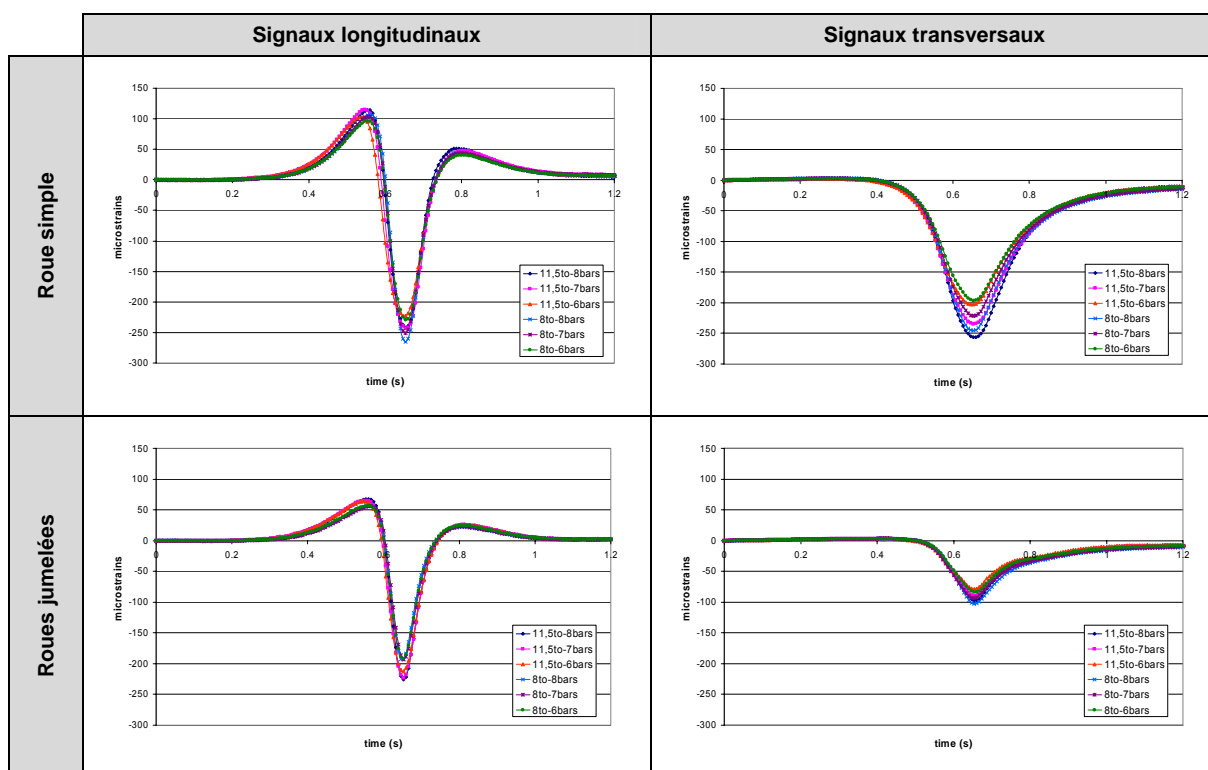


Figure 26 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 30°C - structure de 10 cm

Avant d'analyser ces signaux, il convient de souligner la régularité des mesures : en effet, à l'exception de la zone d'extension centrale où les mesures marquent des légères variations en fonction de leur condition de chargement, les signaux se superposent remarquablement bien.

Ces figures confirment sur l'ensemble des signaux les observations faites à partir des amplitudes maximales pour l'effet des paramètres de chargement, à savoir :

- prédominance de la charge
- déformations plus importantes avec une roue simple
- faible influence de la pression
- effet marqué de la température
- amplitudes maximales égales selon les deux directions pour les roues simples
- déformations plus faibles transversalement que longitudinalement pour les roues jumelées.

Ces représentations mettent également en évidence le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux. Tant longitudinalement que transversalement, c'est la dissymétrie temporelle des signaux qui révèle ce comportement viscoélastique. Cette dissymétrie est particulièrement visible pour les signaux longitudinaux :

- le pic de contraction mesuré à l'approche de la roue est toujours supérieur à celui mesuré après son passage
- la durée entre le pic initial de contraction et l'extension maximale est inférieure à celle entre cette extension maximale et le second pic de contraction.

Cela signifie que la valeur absolue de la vitesse de déformation est supérieure lorsque la roue s'approche du point de mesure que lorsqu'elle s'en éloigne. Ces

différences de vitesse de déformation sont aussi visibles sur les signaux transversaux.

Par ailleurs, les images des signaux permettent d'observer des différences importantes selon la direction de mesures. Les déformations longitudinales et transversales se différencient essentiellement par le fait que les premières induisent une alternance des sollicitations durant le passage de la charge (cf. § 3.2.1). Pour les roues simples, cela signifie que si les extensions maximales sont du même ordre de grandeur dans les deux directions, les variations des déformations dans le temps - leurs vitesses de déformation - sont en revanche très différentes. D'autre part, toutes les amplitudes des pics de déformations longitudinales sont plus importantes pour les roues simples que pour les roues jumelées, ce qui induit des vitesses de déformation plus importantes pour le premier type de roues. La température influence naturellement aussi ces vitesses de déformation. Des analyses approfondies de ces vitesses de déformations sont disponibles dans (Perret 2003).

3.6.2 Comparaison entre signaux expérimentaux et modélisés

Les signaux expérimentaux ont été obtenus à partir d'une charge mobile pour laquelle les déformations en un point fixe étaient mesurées. Cette situation peut être simulée à partir d'une charge statique pour laquelle les déformations sont calculées à différentes distances. En divisant ces distances par la vitesse à laquelle se déplace la charge, il est possible d'obtenir des signaux de déformations provenant de modélisations basées sur le modèle de Burmister.

Les signaux expérimentaux présentent des légères différences selon la direction dans laquelle la charge se déplace. Pour la comparaison, les signaux obtenus selon les deux directions et ceux résultant des modélisations ont été superposés en les centrants sur l'amplitude maximale³⁵. Ce centrage suppose que l'amplitude maximale de déformation est enregistrée lorsque le milieu de la roue passe sur la jauge de mesure. Compte tenu du comportement visqueux des matériaux bitumineux, cette hypothèse n'est probablement pas parfaitement correcte. Les résultats présentés correspondent au cas d'une charge de 11,5 to appliquée sur une roue simple gonflée avec une pression de 8 bars.

³⁵ Aucun système de positionnement de la charge par rapport au capteur n'a été mis en place lors des expériences en vraie grandeur

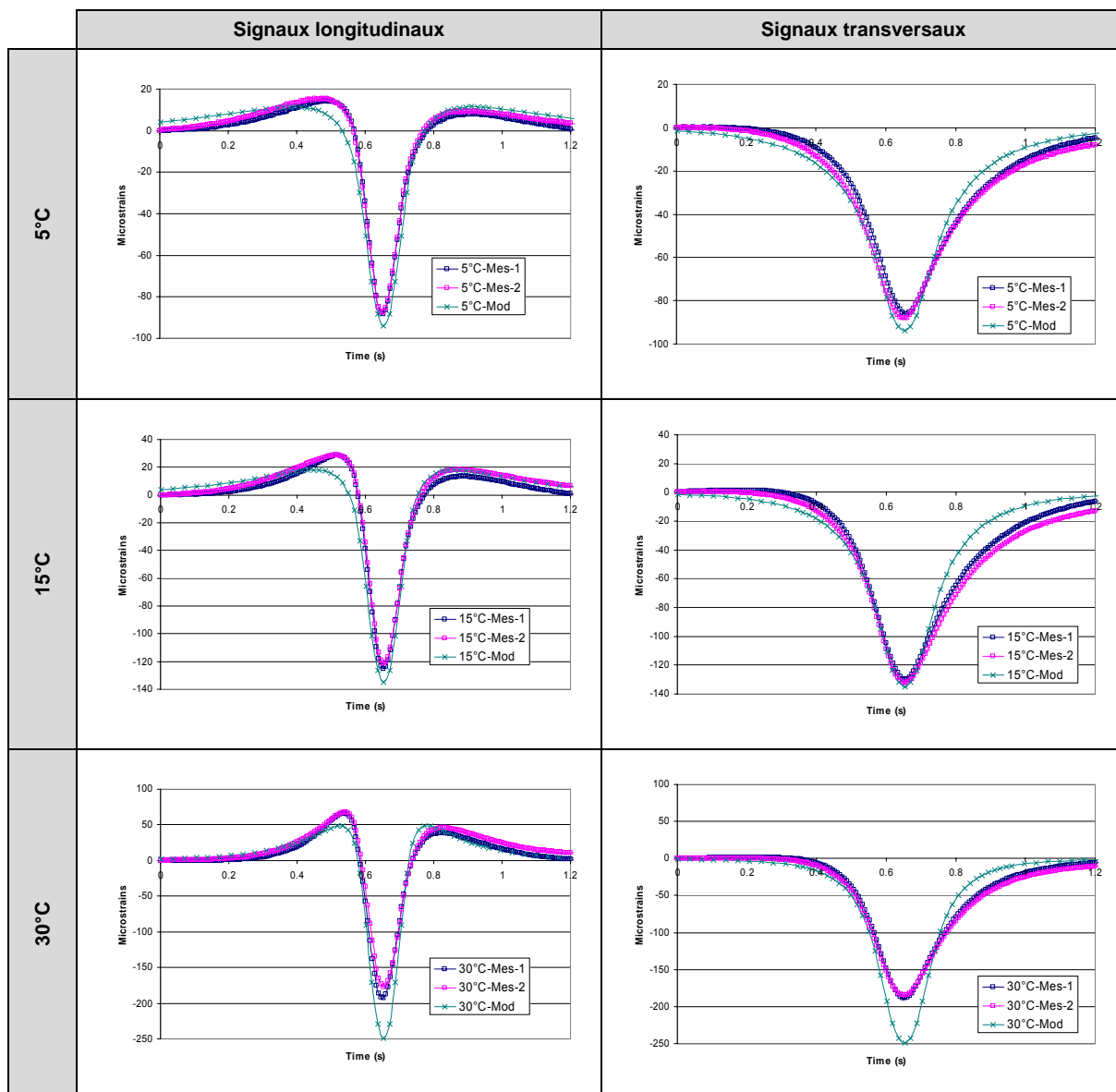


Figure 27 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm

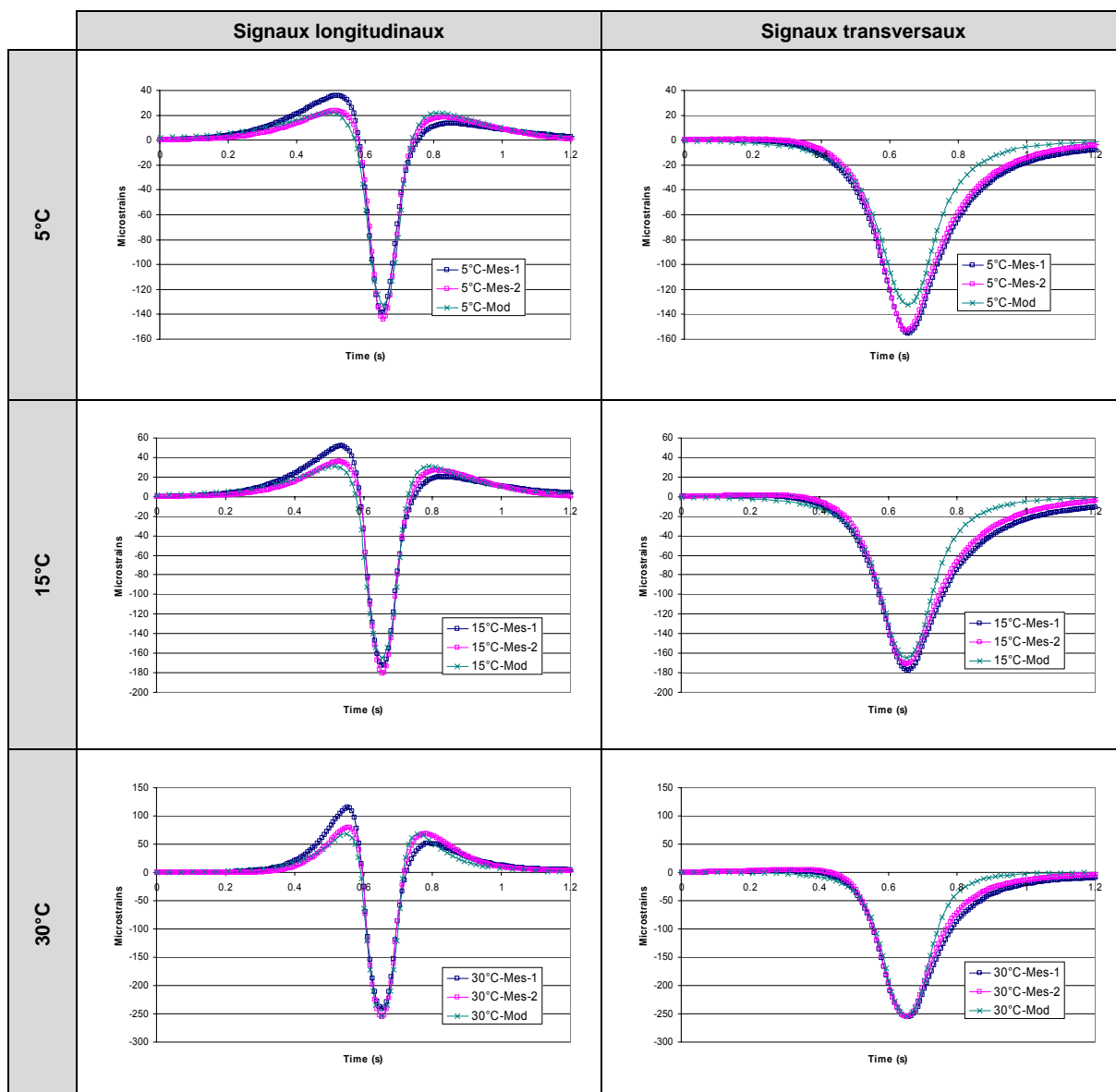


Figure 28 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm

Premièrement, les signaux expérimentaux ne dépendent que peu de la direction dans laquelle la roue se déplaçait lors des mesures - à l'exception des déformations longitudinales dans la structure de 10 cm où le premier signal est plus dissymétrique que le second. Dans l'ensemble, la forme des signaux est bien rendue par les modélisations élastiques, sans évidemment être en mesure de rendre compte du comportement visqueux des matériaux.

Les observations suivantes peuvent être faites pour les signaux longitudinaux :

- la modélisation est meilleure pour les extensions que pour les contractions
- la modélisation des zones d'extension est excellente tant en ce qui concerne les amplitudes que la forme générale du signal
- les contractions maximales des signaux expérimentaux sont plus éloignées des extensions maximales que celles obtenues par modélisation. Ceci a pour

conséquence que la variation des déformations à l'approche de la charge est mal reproduite.

Pour les signaux transversaux :

- les amplitudes maximales sont aussi bien estimées, à l'exception des mesures à 30°C pour la structure de 17 cm
- la forme générale des zones d'extension n'est pas aussi bien rendue que longitudinalement. La seconde partie des signaux expérimentaux présente une diminution des déformations moins rapide que celle obtenue par modélisation alors que la première partie (augmentation des déformations) correspond nettement mieux
- les signaux expérimentaux sont plus ouverts que ceux des modélisations, particulièrement dans leur seconde partie³⁶.

3.7 Signaux de déformation au bas de la couche de roulement

3.7.1 Effets des conditions de chargement sur les résultats expérimentaux

Les représentations sont données selon des principes similaires à ceux énoncés pour les déformations au bas de la couche de base (cf. § 3.6). En revanche, et pour des raisons évidentes à la vue de la forme des signaux, ces derniers ne sont pas systématiquement centrés sur l'amplitude maximale, mais sur la position présumée du milieu de la roue³⁷. Les représentations des signaux sont données par température et par structure (Figure 29 et Figure 30).

³⁶ Cette différence est caractéristique du comportement viscoélastique et ne peut bien entendu pas être rendue par des modélisations élastiques

³⁷ Aucun système de positionnement de la charge par rapport au capteur n'a été mis en place lors des expériences en vraie grandeur

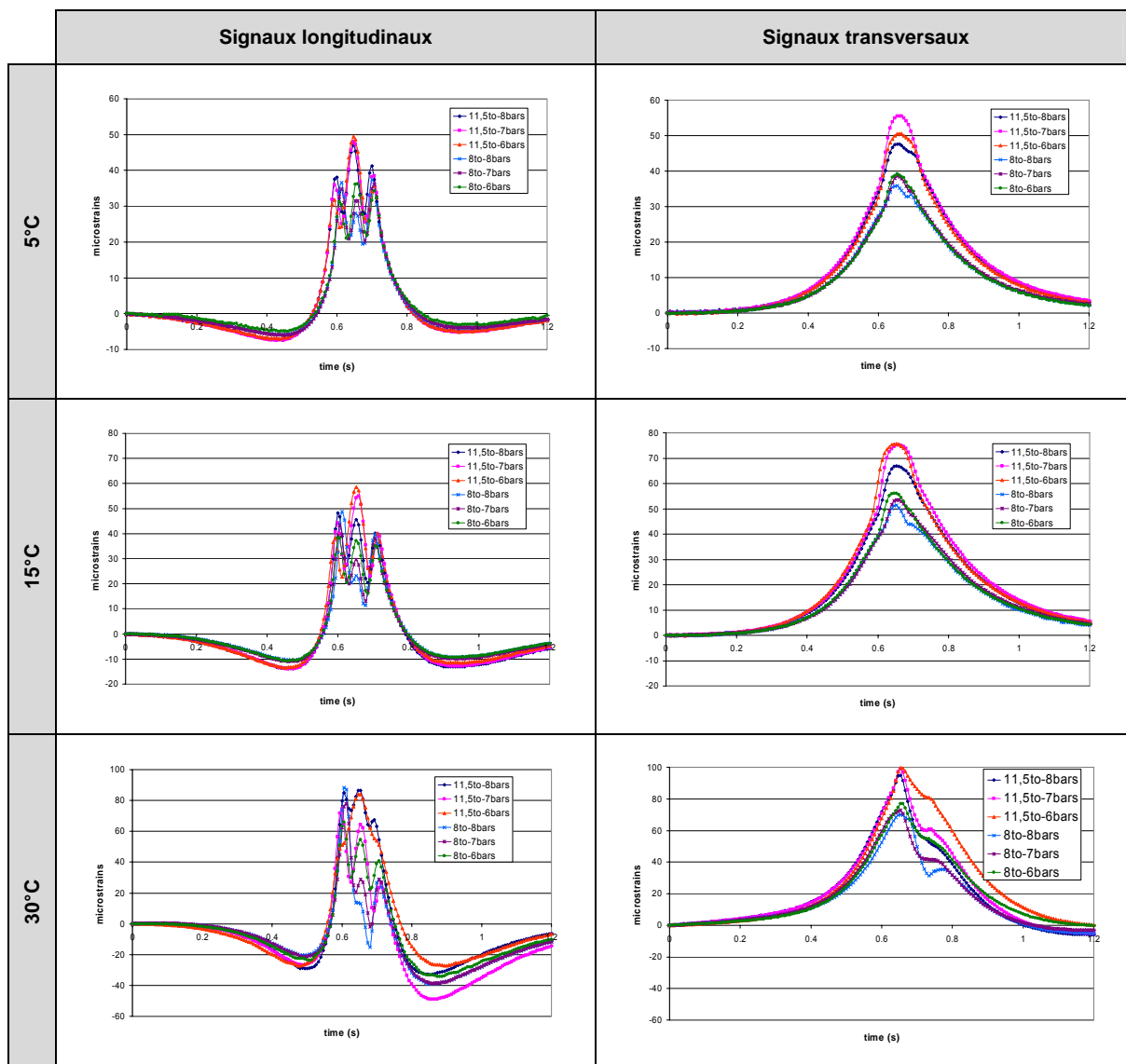


Figure 29 : Signaux de déformations au bas de la couche de roulement - structure de 17 cm

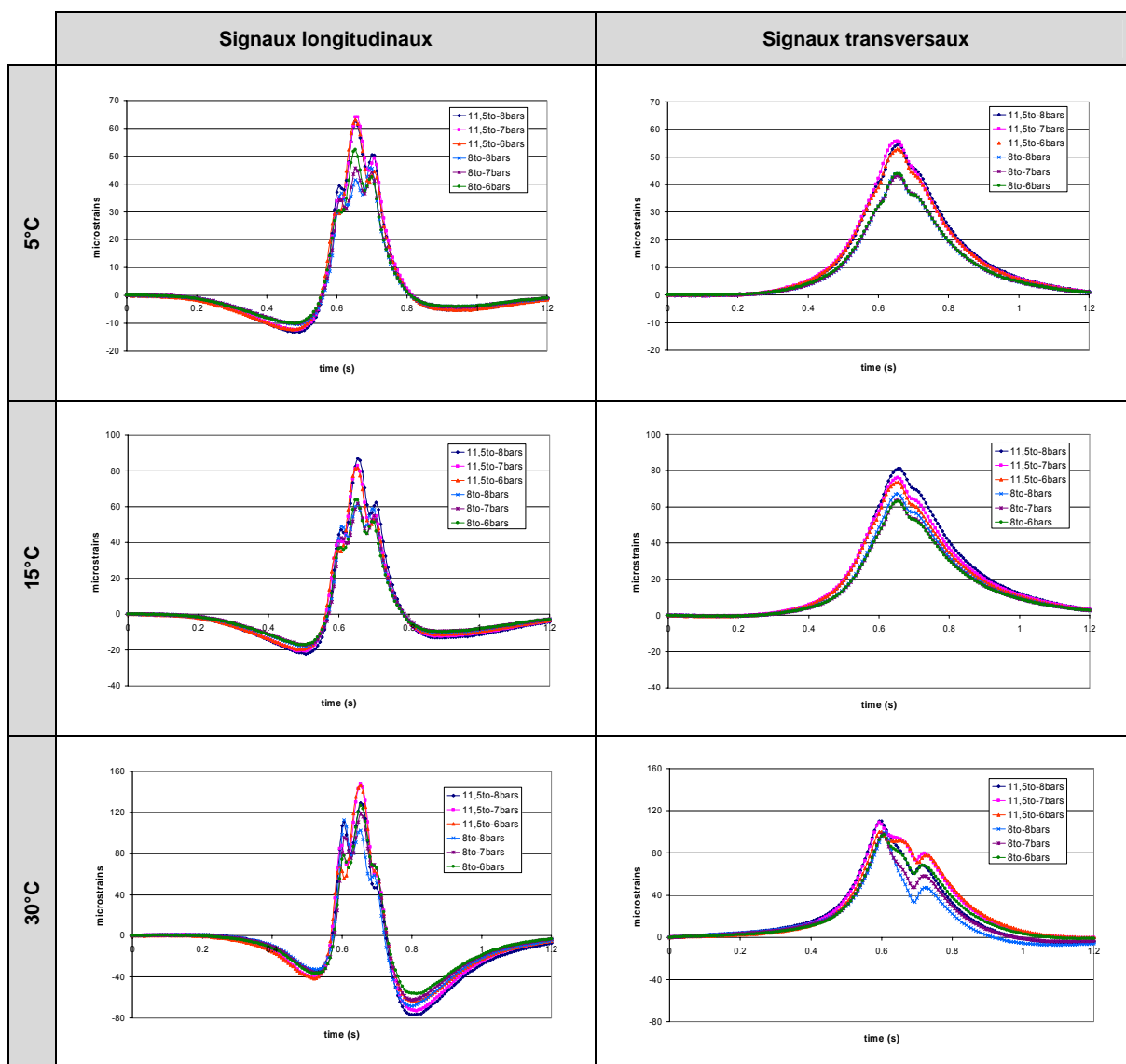


Figure 30 : Signaux de déformations au bas de la couche de roulement - structure de 10 cm

L'essentiel de ce qui a été observé sur les signaux au bas des couches est également valable ici. Premièrement, les signaux se superposent à nouveau remarquablement bien, particulièrement dans la phase d'approche de la charge, attestant une nouvelle fois de la qualité du système de mesure.

Concernant l'effet des conditions de chargement, c'est encore essentiellement l'intensité de la charge qui influence les déformations alors que la pression de gonflage des pneumatiques ne joue qu'un rôle secondaire. Enfin, les signaux enregistrés présentent également d'importantes dissymétries révélatrices du comportement visqueux des matériaux bitumineux.

Pour les signaux longitudinaux, une importante différence, indépendante des conditions de chargement ou de la rigidité de la structure, peut être observée en fonction de la température : pour l'ensemble des mesures effectuées à 30°C, les extensions enregistrées après le passage de la roue sont systématiquement supérieures à celles obtenues lors de son approche alors que la tendance est totalement inversée pour les mesures effectuées à 5°C ou à 15°C. Si la situation

observée à 30°C paraît illogique (le fort pic de contraction enregistré au passage de la roue devrait réduire l'amplitude de l'extension après le passage de la roue), elle doit néanmoins être prise en compte en raison de la systématique avec laquelle elle se répète. De plus une tendance similaire est observée sur les signaux transversaux puisque les mesures à 30°C semblent indiquer des déformations résiduelles après le passage de la charge opposées à celles obtenues à 5°C et 15°C (cf. § 3.2.2).

La partie centrale des signaux expérimentaux présente une courbe d'allure très surprenante et fortement « irrégulière » lors du passage de la roue, tout particulièrement pour les déformations longitudinales (cf. § 3.2.2). Une étude menée dans le cadre du projet de coopération européenne COST 333 avait relevé la présence de ce genre de perturbation dans les signaux au bas de la couche de roulement, mais sans les analyser dans le détail (Ekdahl 1998). Il avait alors été admis que ce phénomène devait être imputé à un problème de mesures lié à l'utilisation des jauges de déformations à très faible profondeur et les signaux avaient été jugés inutilisables. D'autre part, dans le cadre de projets d'essais en vraie grandeur menés par l'OCDE (OCDE 1985), (Dumont and Scazziga 1985) et (OCDE 1991), des signaux présentant ce genre de perturbations ont systématiquement été éliminés des analyses, également sous prétexte que ces « irrégularités » étaient imputables à un problème du système de mesures.

Une visualisation systématique des signaux, pour tous les cas de charge et toutes les positions transversales, a montré que les « irrégularités » n'apparaissent que lorsque les pneumatiques se trouvent au-dessus (ou à proximité immédiate) de la jauge de mesure³⁸. Il est logique de penser qu'elles sont dues aux fortes sollicitations induites par les roues au bas de la couche de roulement, tout particulièrement à la composante verticale des contraintes. La question se pose cependant de savoir si ces fortes sollicitations affectent réellement les déformations des matériaux bitumineux ou si elles perturbent le fonctionnement du système de mesure.

Une observation détaillée des « irrégularités » montre que la zone centrale du signal se décompose en 6 zones clairement définies³⁹ alternant des augmentations et des diminutions des déformations (Figure 31) :

³⁸ A titre d'exemple, certains signaux mesurés entre les roues du jumelage ne présentent pas d'« irrégularités »

³⁹ Surtout à basse température et pour la structure la plus épaisse

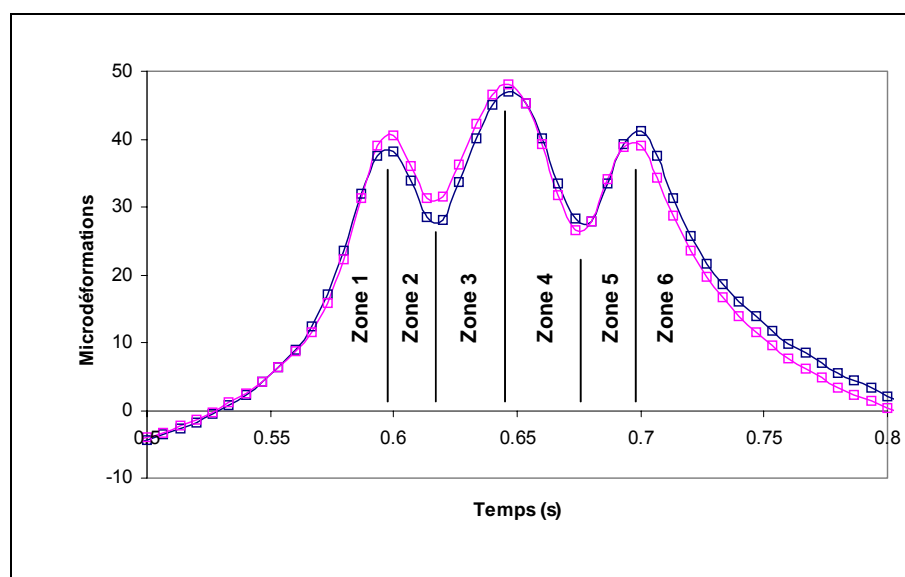


Figure 31 : Détail et décomposition des « irrégularités » dans la zone centrale d'un signal de déformation longitudinale à la base de la couche de roulement

En première analyse, on peut supposer que les zones 3 et 4 constituent le maximum du signal mais qu'un phénomène, lié au système de mesures, tend à abaisser cette partie du signal. C'est ce type d'explications qui est généralement donné pour justifier l'exclusion de ces signaux des analyses.

Les signaux ne présentant ces « irrégularités » que lorsque la charge est au-dessus du point de mesure, il est intéressant de déterminer leurs longueurs. Ces dernières sont calculées à partir du temps écoulé entre la fin de la zone 1 et le début de la zone 6 qui est multiplié par la vitesse de la charge. Les longueurs correspondent aux mesures effectuées sur la structure de 17 cm et pour des charges appliquées par une roue simple (Tableau 17).

Tableau 17 : Longueurs (en cm) des « irrégularités » (zone 2 à 5) des signaux expérimentaux - structure de 17 cm

	11,5 to - 8 bars	11,5 to - 7 bars	11,5 to - 6 bars	8 to - 8 bars	8 to - 7 bars	8 to - 6 bars
5°C	29.2	31.1	32.1	25.3	26.3	29.2
15°C	31.1	33.1	34.0	26.3	28.2	30.1
30°C	27.2	33.1	33.1	28.2	27.2	28.2
Moyenne	29.2	32.4	33.1	26.6	27.2	29.2

Avec une fréquence d'acquisition de 150 Hz et une vitesse réelle de la charge de 10,5 km/h, la distance entre chaque point de mesure est d'environ 2 cm. Compte tenu de cette précision, on constate que ces longueurs ne dépendent pas de la température. En revanche, les valeurs moyennes mesurées augmentent avec la charge et diminuent avec la pression. Une autre méthode pour visualiser l'effet des conditions de chargement sur ces longueurs consiste à superposer la zone centrale de deux signaux en faisant varier soit l'intensité de la charge à pression constante, soit la pression pour une intensité constante (Figure 32).

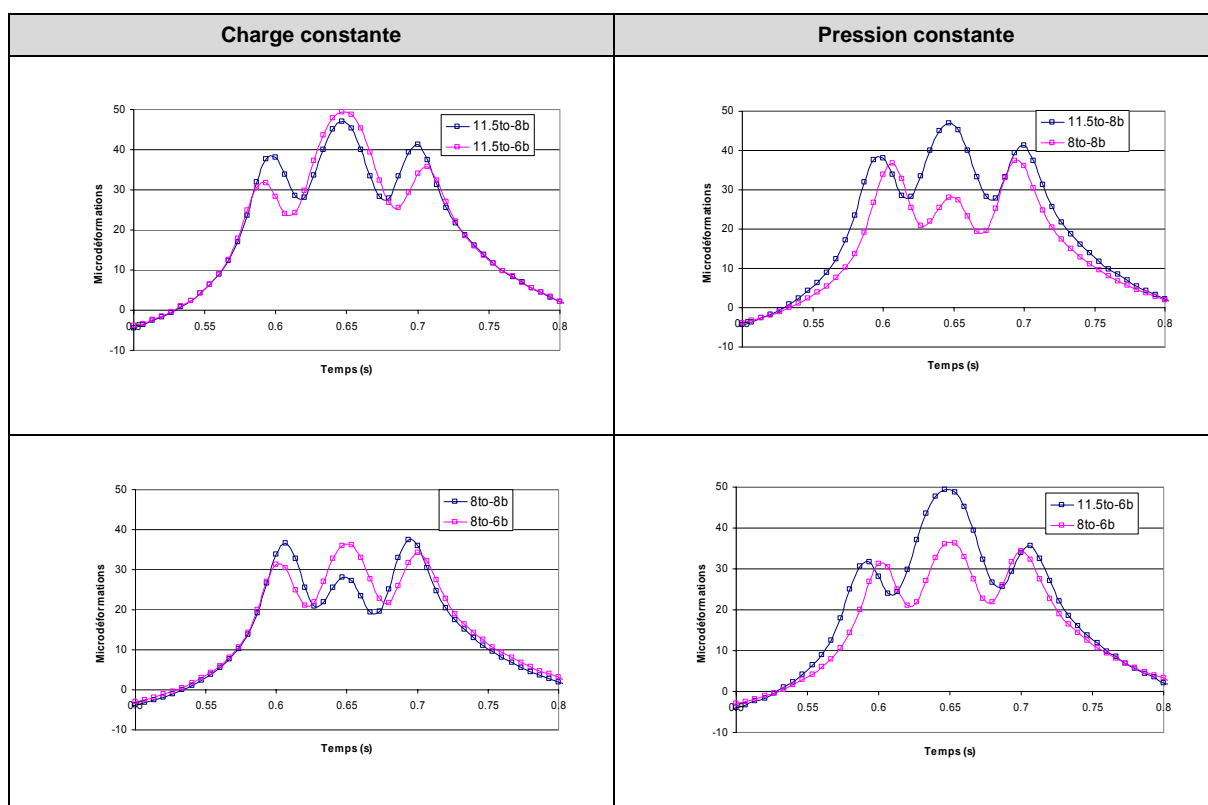


Figure 32 : Superposition des « irrégularités de signaux longitudinaux pour différentes conditions d'intensité de charge et de pression - structure de 17 cm à 5°C

Les figures à charge constante confirment qu'une diminution de la pression implique un allongement de la zone perturbée, alors que les figures à pression constante montrent que l'augmentation de l'intensité va de pair avec un allongement de la zone perturbée. Ces observations sont similaires à celles concernant les longueurs des empreintes des pneumatiques lorsqu'on modifie les conditions de chargement (voir Figure 5, page 14). Les longueurs des empreintes et celles des « irrégularités » sont comparées pour quatre des cas de charge présentés ci-dessus⁴⁰ (Tableau 18).

Tableau 18 : Longueurs des surfaces de contact et longueurs des « irrégularités »

	11,5 to - 8 bars	11,5 to - 6 bars	8 to - 8 bars	8 to - 6 bars
Longueur des empreintes (cm)	26.7	30.3	21.7	24.2
Longueur moyenne des « irrégularités » (cm)	29.2	33.1	26.6	29.2

Cette comparaison confirme que les « irrégularités » sont directement liées à la présence de la roue au-dessus du point de mesure, donc à l'apparition d'une importante compression verticale. Compte tenu de la diffusion de la charge dans les premiers centimètres des couches bitumineuses, il est logique que les « irrégularités » soient systématiquement légèrement plus longues que les empreintes.

Ces observations tendent à prouver que les « irrégularités » ne sont pas dues à des problèmes liés au système de mesures, mais qu'elles traduisent effectivement des brusques variations des déformations horizontales au bas de la couche de roulement lors du passage de la charge, ces variations étant vraisemblablement dues à

⁴⁰ Aucune mesure d'empreinte n'a été effectuée avec une pression de 7 bars

l'introduction d'une forte compression verticale. Ce qui suit montrera que les constats effectués sur les signaux expérimentaux sont confirmés par les modélisations et qu'il est possible d'expliquer mécaniquement ces « irrégularités ».

3.7.2 Comparaison entre signaux expérimentaux et modélisés

Les signaux obtenus par modélisation l'ont été selon le même principe que pour les déformations au bas de la couche de base (cf. § 3.6.2), c'est à dire en divisant par la vitesse les distances séparant les points de calcul du milieu de la charge. Des signaux expérimentaux obtenus selon les deux directions de déplacement de la charge sont superposés avec ceux résultant des modélisations. Ils sont centrés sur la position estimée du milieu de la roue. Les résultats correspondent toujours aux déformations pour une charge de 11,5 to appliquée sur une roue simple gonflée avec une pression de 8 bars (Figure 33 et Figure 34).

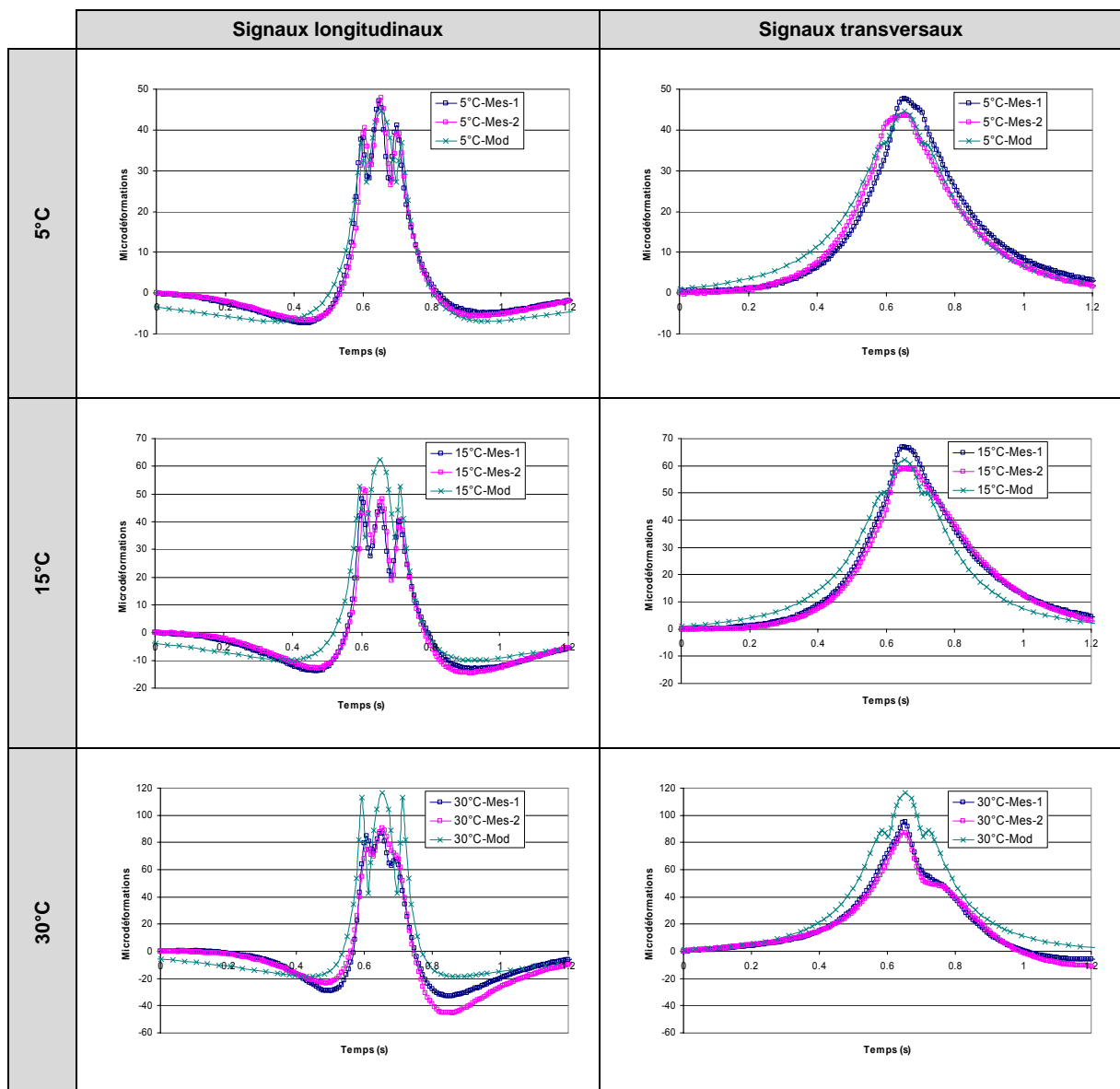


Figure 33 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm

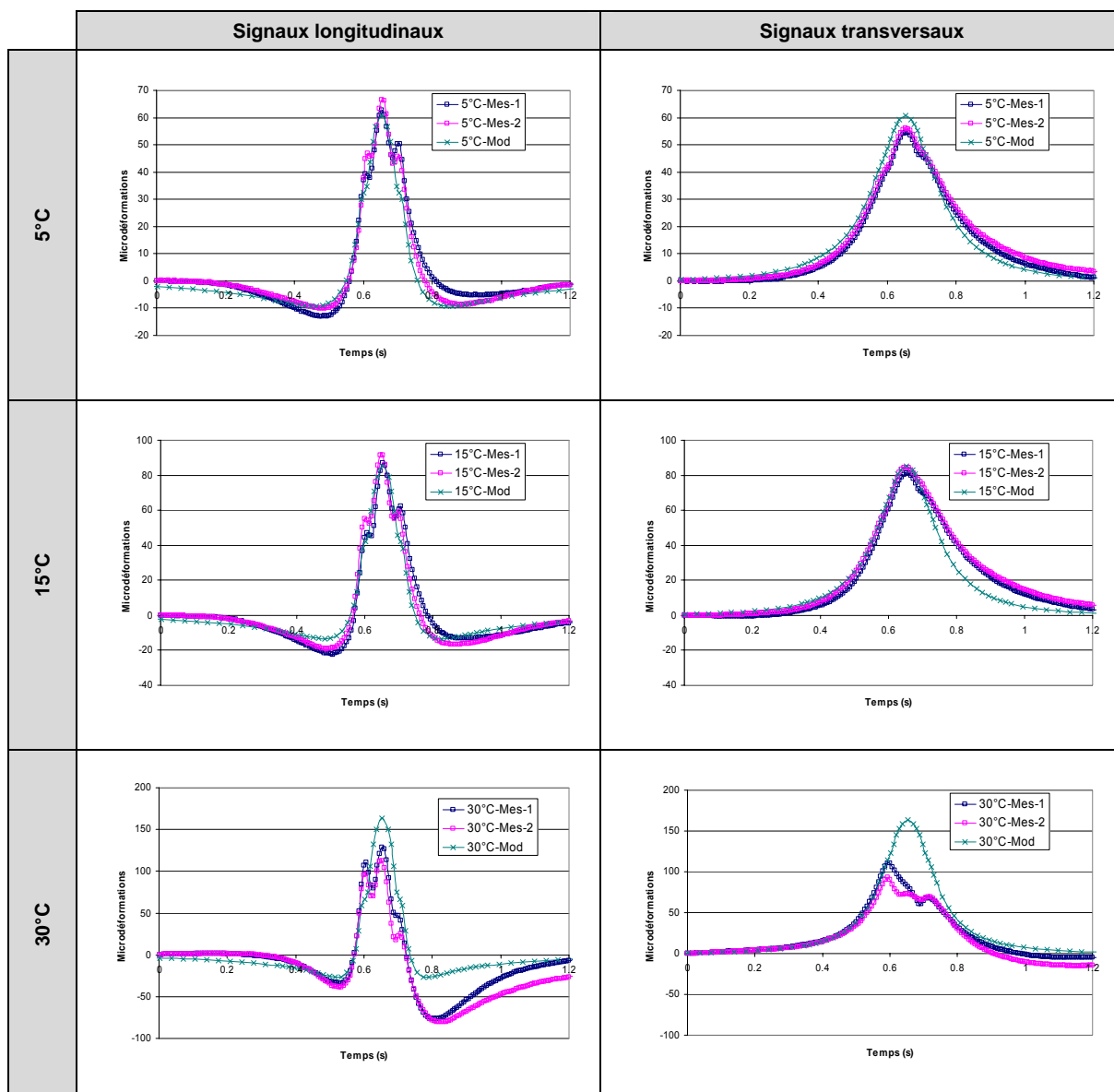


Figure 34 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm

Le constat le plus intéressant est que les signaux modélisés présentent des « irrégularités » plus ou moins similaires à celles observées sur les signaux expérimentaux. De plus, et toujours en accord avec les mesures, elles sont plus marquées sur la structure la plus épaisse et pour les déformations longitudinales. Ces résultats prouvent de façon définitive que les « irrégularités » correspondent effectivement à des brusques variations des déformations horizontales au bas de la couche de roulement et qu'elles ne doivent pas être attribuées aux équipements de mesures et à leurs éventuelles imperfections.

Concernant les résultats des modélisations, ils sont similaires à ceux obtenus pour les déformations au bas de la couche de base :

- très bonne concordance entre les mesures et les modélisations pour les températures de 5 et 15°C : les amplitudes maximales sont très proches dans les deux directions et pour les deux structures

- concordance légèrement moins bonne à 30°C : tendance des modélisations à surestimer les déformations, tout particulièrement pour la structure la moins épaisse
- les pics d'extension mesurés à l'approche de la charge et après son passage sont relativement bien estimés quant à leur amplitude, mais sont généralement mal situés par rapport à la contraction maximale. Les écarts dans le positionnement de ces pics étant d'autant plus importants que la structure est rigide
- à 30 °C, les forts pics d'extension après le passage de la charge ne sont absolument pas rendus par les modélisations.

3.7.3 Mise en évidence et description des « irrégularités »

Les images détaillées des « irrégularités » de la Figure 31 et de la Figure 32 montrent que les variations de déformations mesurées sont enregistrées dans des intervalles de temps très réduits. Les zones 3 et 5 ne contiennent que trois ou quatre points de mesure, qui correspondent à des distances très courtes. Ces « irrégularités » n'ont donc pu être mesurées que grâce à l'utilisation d'une fréquence d'acquisition relativement élevée (150 Hz) par rapport à la vitesse réelle de la charge (10,5 km/h). Une diminution de la fréquence d'acquisition ou une augmentation de la vitesse entraînerait un accroissement de la distance entre les points de mesure qui risquerait de supprimer l'enregistrement des « irrégularités ». Ce risque de ne pas relever ces variations a aussi été mis en évidence lors des modélisations.

Dans un premier temps, les points de calcul pour les modélisations avaient été choisis espacés de 5 cm sous la charge, puis de 10 cm lorsqu'on se trouvait hors de la zone d'application. Les signaux obtenus montraient certes quelques irrégularités, mais sensiblement moins marquées que celles observées à partir des mesures. Compte tenu de l'écart d'environ 2 cm entre les points de mesures, les points de calculs ont été rapprochés à 2,5 cm pour un second calcul. Des calculs ont été effectués sur une distance de 40 cm depuis le milieu de la roue et sur la base des deux espaces mentionnés (Figure 35)⁴¹.

⁴¹ Compte tenu de la symétrie des signaux modélisés, seule la moitié des signaux est représentée

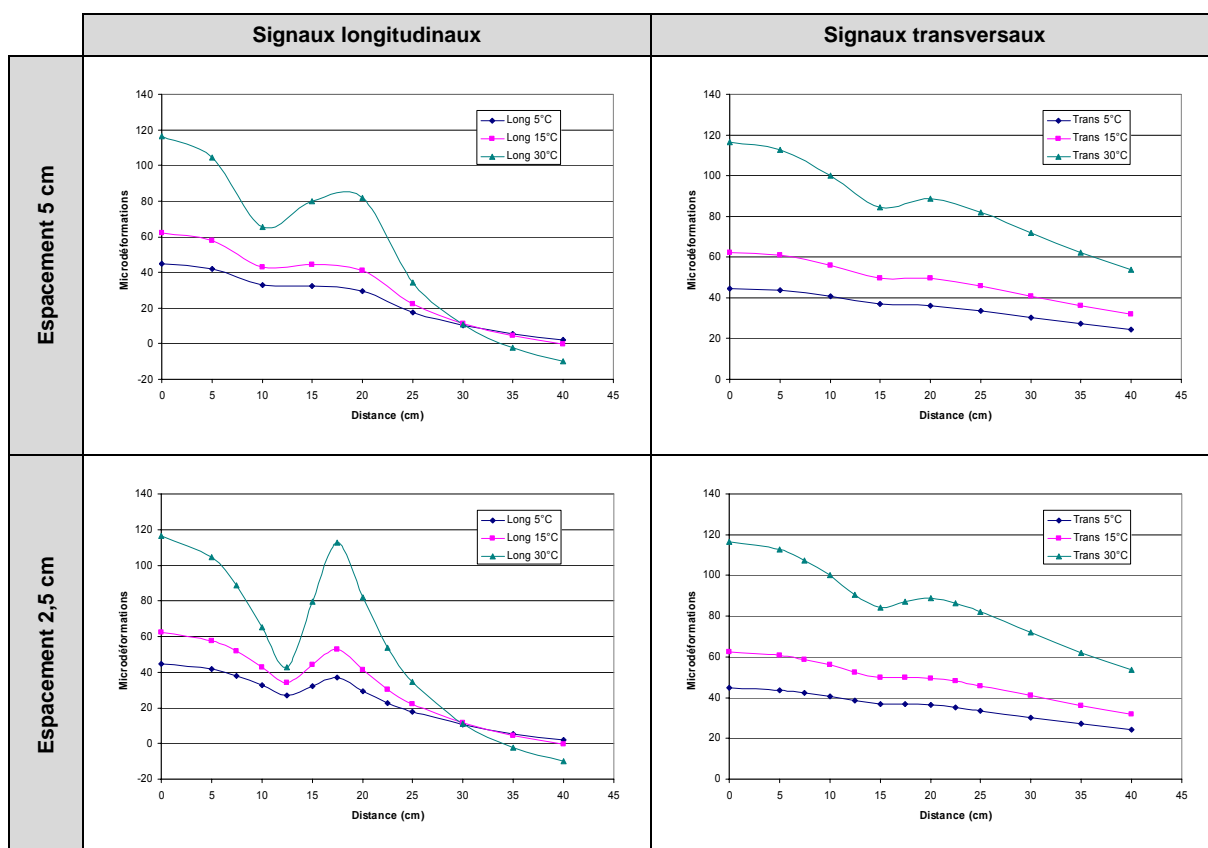


Figure 35 : Détail de la modélisation de la zone centrale des signaux longitudinaux de déformation à faible profondeur, structure de 17 cm

Ces images montrent que l'espacement choisi entre les points de calcul des signaux se révèle décisif pour la forme générale obtenue. Pour les signaux longitudinaux, la valeur déterminante est obtenue à 17,5 cm du milieu de la roue et cette valeur n'apparaît pas dans le premier calcul avec un espace de 5 cm entre les points. A noter que pour le cas de charge retenu (11,5 to, 8 bars sur pneu simple), le rayon de l'empreinte circulaire définie pour la modélisation est d'environ 15 cm. Compte tenu de la diffusion des efforts dans la structure et d'une profondeur de 3 cm, cette position de 17,5 cm correspond approximativement à la limite de la zone de diffusion des contraintes verticales engendrées par la charge. Il est dès lors indéniable que l'apparition des « irrégularités » est liée à la brusque apparition d'une forte contrainte verticale.

3.7.4 Explication théorique et physique des « irrégularités »

Les « irrégularités » s'expliquent très bien à partir de l'évolution des états de contraintes lors du passage de la roue. Si les contraintes longitudinales et transversales augmentent de façon régulière à l'approche de la charge, les contraintes verticales subissent une brusque augmentation dès l'instant où les points de calcul sont situés sous la charge (Figure 36).

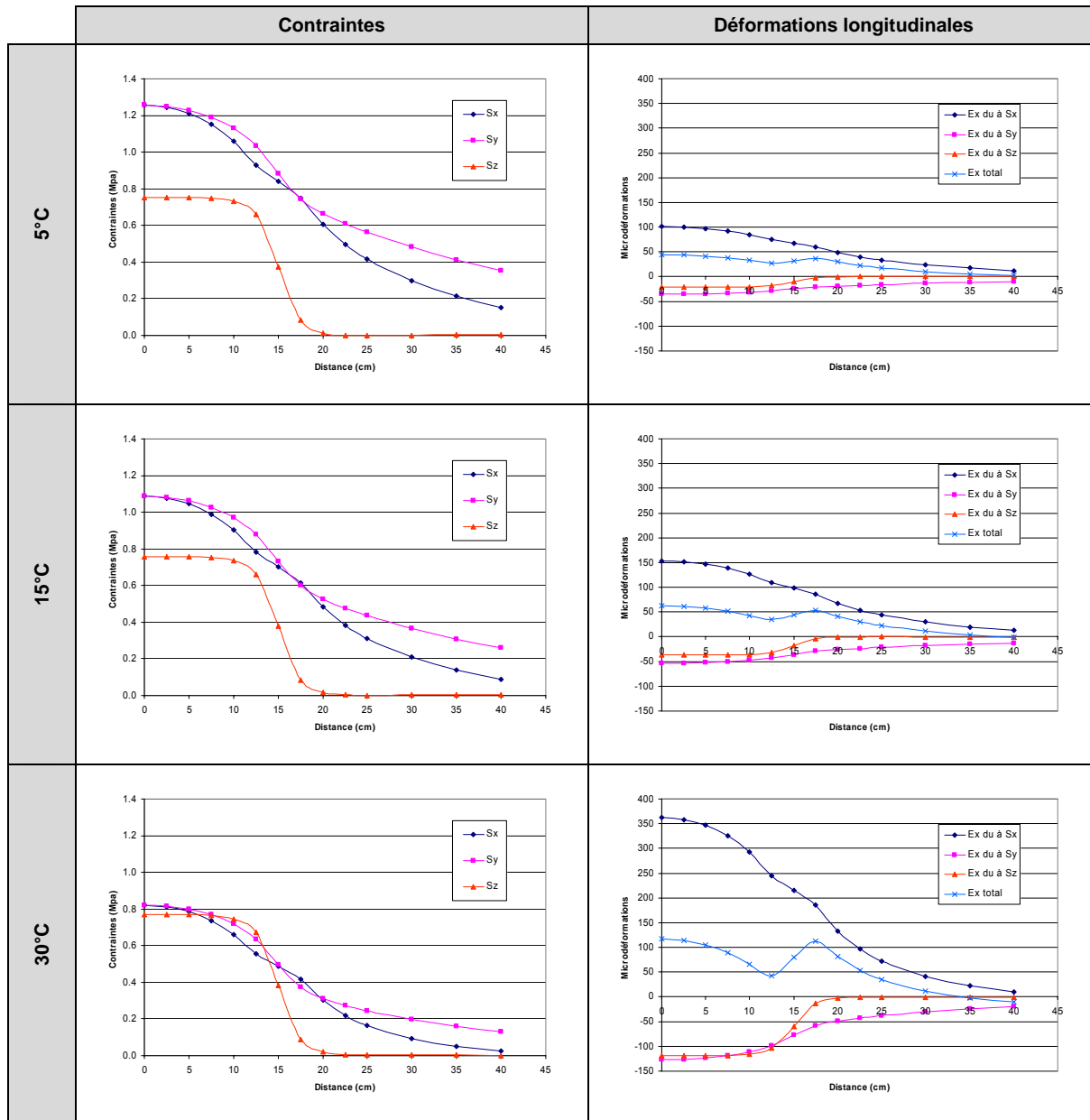


Figure 36 : Composantes des contraintes (gauche) et contribution de ces composantes sur les déformations longitudinales (droite)⁴²

La contrainte verticale sous la charge est logiquement voisine de la pression de 8 bars et demeure quasiment constante quelle que soit la température. En revanche, les contraintes horizontales augmentent avec la rigidité de la structure, ce qui signifie qu'elles sont plus importantes à basse qu'à haute température.

De plus, il faut souligner que les contraintes horizontales sont toujours supérieures aux verticales, ce qui peut sembler paradoxal. En effet, cela signifie qu'à faible profondeur, les matériaux bitumineux sont plus fortement comprimés horizontalement que verticalement, ceci même juste au droit la charge. A faible profondeur, les compressions verticales sont insuffisantes pour que les déformations verticales ne soient pas des extensions. On aboutit alors à une situation à priori paradoxale : juste

⁴² Les contraintes σ et les déformations ε sont respectivement désignées par S et E sur cette figure

sous la charge, où une forte compression verticale est appliquée par la pression de la roue, les déformations verticales sont des extensions dans les premiers centimètres des couches bitumineuses⁴³.

Pour en revenir aux « irrégularités », les déformations longitudinales peuvent être calculées à partir des contraintes avec la relation de Hooke tridimensionnelle :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \text{Eq. 12}$$

Il est possible de séparer les contributions de chaque composante des contraintes dans le calcul de la déformation longitudinale :

$$\varepsilon_x(\sigma_x) = \frac{1}{E} \sigma_x \quad \text{Eq. 13}$$

$$\varepsilon_x(\sigma_y) = -\nu \frac{1}{E} \sigma_y \quad \text{Eq. 14}$$

$$\varepsilon_x(\sigma_z) = -\nu \frac{1}{E} \sigma_z \quad \text{Eq. 15}$$

Les contributions en terme de déformations longitudinales des trois composantes des contraintes sont représentées à droite sur la Figure 36 avec leur somme.

Les contraintes longitudinales σ_x et transversales σ_y sont approximativement du même ordre de grandeur. La composante transversale σ_y engendre une diminution proportionnelle des déformations longitudinales dues à la composante longitudinale σ_x d'environ 35 % (valeur du coefficient de Poisson). En revanche, la brusque variation de la contrainte verticale σ_z , dont l'intensité est quasi constante sous la zone de charge, implique une variation constante et non proportionnelle des déformations longitudinales dans cette zone, qui vient s'ajouter à celles provenant des contraintes horizontales.

En considérant l'équation pour la déformation longitudinale ε_x et compte tenu que les composantes horizontales sont du même ordre de grandeur dans la zone sous la charge, l'importance⁴⁴ des « irrégularités » dépend de la valeur du coefficient de Poisson et du ratio entre les composantes horizontales et verticales des contraintes. A titre d'exemple, dans le cas à 30°C présenté à la Figure 36, la contrainte verticale σ_z , qui est du même ordre de grandeur que la transversale σ_y , implique elle aussi une réduction d'environ 35 % (toujours égale au coefficient de Poisson). Sous la roue, la déformation longitudinale totale ε_x est égale au tiers de la déformation $\varepsilon_x(\sigma_x)$ due à la contrainte longitudinale.

⁴³ A noter que ces extensions ne signifient pas que les matériaux subissent un déplacement vertical vers le haut. En revanche, elles signifient que le point subissant le déplacement vertical le plus important n'est pas en surface, mais à quelques centimètres de profondeur

⁴⁴ Cette importance est définie par le ratio entre la déformation au milieu de la roue et celle au bord de la charge

Pour un coefficient de Poisson constant, il est évident que les « irrégularités » seront d'autant plus importantes que le ratio entre les contraintes horizontales et verticales sera petit. Ce ratio va diminuer au fur et à mesure que l'on descend dans la structure : les contraintes horizontales, qui ne sont en compression que dans la partie supérieure des couches bitumineuses⁴⁵, évoluent beaucoup plus rapidement avec la profondeur que les verticales qui demeurent en compression quelle que soit la profondeur. Par conséquent, l'importance des « irrégularités » doit augmenter avec la profondeur. Des calculs effectués à 4 et 5 cm de profondeur pour la température de 30°C confirment ces explications (Figure 37).

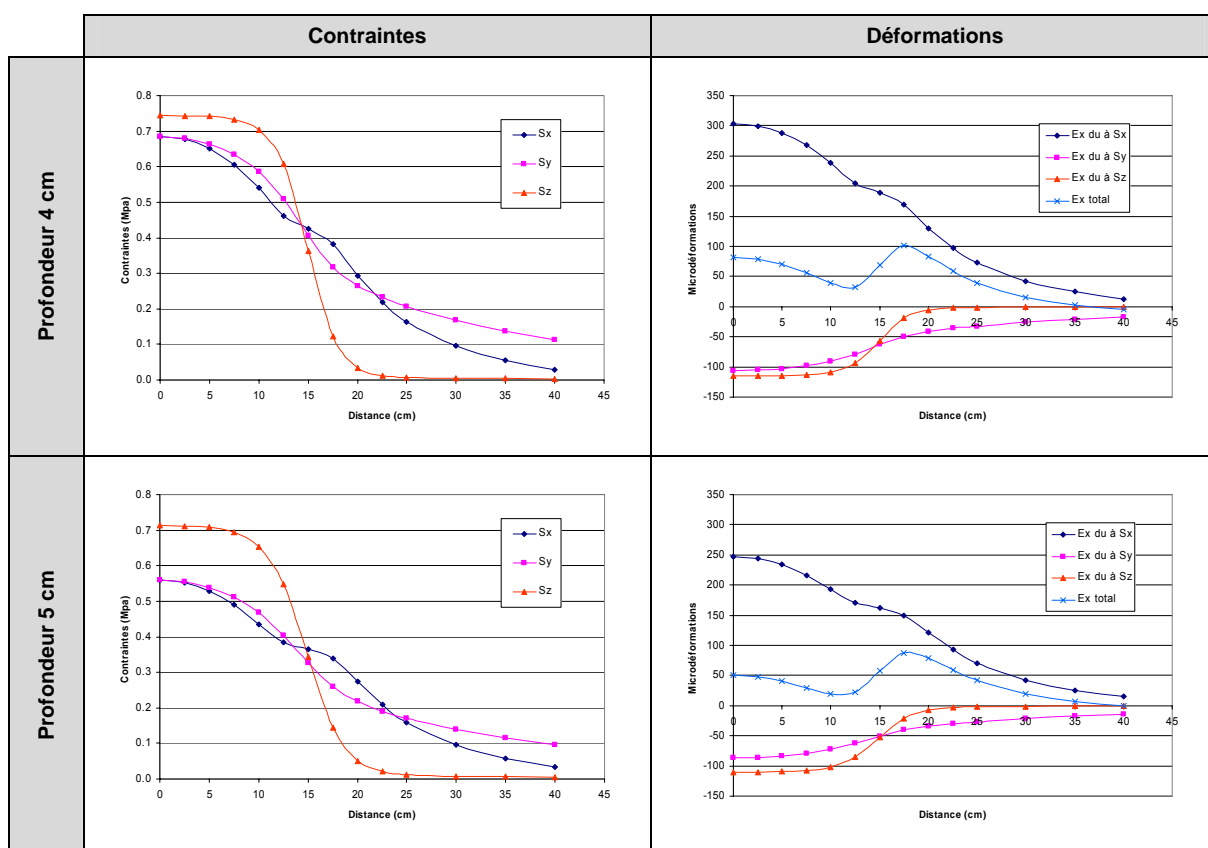


Figure 37 : Composantes des contraintes (gauche) et contribution de ces composantes sur les déformations longitudinales (droite) à des profondeurs 4 et 5 cm⁴⁶

Ces résultats sont conformes aux suppositions émises, puisqu'on observe que les composantes horizontales diminuent bien plus rapidement que les verticales. L'importance des « irrégularités » augmente dans le sens que les déformations maximales ne doivent plus être cherchées au milieu de la charge, mais à ses extrémités et que le ratio entre la valeur à cet endroit et celle au milieu de la charge tend à augmenter : les ratios sont respectivement de 0,97, 1,24 et 1,73 pour les profondeurs de 3, 4 et 5 cm. Dans les deux derniers cas, les amplitudes maximales ne sont pas situées au milieu mais aux extrémités de la zone de charge.

Si les explications données jusqu'ici se basent essentiellement sur les résultats de la théorie de l'élasticité, il est utile de proposer une appréhension plus physique du

⁴⁵ Les « irrégularités » ne peuvent apparaître que lorsque les contraintes horizontales sont en compression

⁴⁶ idem note 42, page 64

phénomène. A faible profondeur, avant que la charge ne soit au dessus d'eux, les matériaux sont essentiellement en compression dans le plan horizontal et libre de se dilater verticalement. En terme de déformations, cela se traduit par des contractions longitudinales et transversales et des extensions verticales. Lorsque la roue passe au-dessus de ces matériaux, elle introduit une compression verticale qui tend (effet de Poisson) à induire un gonflement dans le plan horizontal. C'est ce gonflement latéral (empêché toutefois de se développer librement par les fortes contraintes horizontales) qui est à l'origine des « irrégularités ».

3.8 Synthèse

L'analyse des signaux à faible profondeur a permis d'expliquer les causes des « irrégularités » observées sur les signaux expérimentaux. De plus, les modélisations élastiques se sont révélées pertinentes pour ces explications. Comme pour les signaux au bas de la couche de base, les modélisations donnent des résultats qui concordent bien avec les valeurs expérimentales pour les températures de 5 et 15°C.

Le principal résultat de ce chapitre a été de montrer qu'à faible profondeur, les matériaux bitumineux subissent des contraintes horizontales nettement supérieures aux contraintes verticales, même au droit de la charge. Ce résultat est très paradoxal, puisqu'il signifie que les matériaux proches de la surface de roulement des chaussées sont plus violemment sollicités horizontalement que verticalement. Cet état de contrainte montre que les couches bitumineuses sont essentiellement sollicitées en flexion et que leur comportement est proche de celui des dalles. Il n'est dès lors pas étonnant que ce soit plutôt l'intensité de la charge que la pression de gonflage des pneus qui influence les déformations dans les couches bitumineuses des chaussées souples.

4. Exploitation des résultats pour le calcul du trafic équivalent

4.1 Démarche

Malgré des limites évidentes pour le dimensionnement des chaussées, la notion de trafic équivalent sera encore utilisée durant de nombreuses années, notamment en raison de sa simplicité à fournir des estimations des trafics circulant sur les routes. Il est donc nécessaire de pouvoir introduire les résultats expérimentaux et théoriques obtenus dans les méthodes de calcul du trafic équivalent. Afin de conserver le principal avantage du trafic équivalent - sa facilité de calcul - les relations proposées doivent rester simples et ne pas faire appel à des données de trafic trop détaillées.

Les modèles de performance suivant généralement des lois de type puissance sur la base des déformations, il est raisonnable de conserver la forme de loi de puissance pour le calcul du trafic équivalent. Pour les mêmes raisons, il n'est pas non plus judicieux de chercher à modifier la valeur de la puissance.

En revanche, il convient d'essayer d'introduire les ratios de déformations définis pour les différents paramètres de charge. Toutefois, il a été montré que certains paramètres de charge ont des effets liés entre eux ou avec la rigidité des structures (épaisseur et température). D'autre part, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont valables pour des variations définies des paramètres de charge⁴⁷. Par conséquent les formules proposées dans les chapitres qui suivent doivent être comprises comme une tentative d'exploitation des résultats d'une étude particulière et ne peuvent pas être généralisées sans autre précaution.

4.2 Intensité de la charge

Pour pouvoir tirer des conclusions générales applicables à un calcul simple du trafic équivalent, il est indispensable de calculer des valeurs moyennes pour les ratios. Elles ont été effectuées en groupant les résultats des différentes températures et des différentes pressions de gonflage (Tableau 19 et Tableau 20). Ce choix est notamment fondé sur le fait que ces informations (températures et pressions) sont rarement disponibles à partir des données de trafic⁴⁸.

⁴⁷ Seulement deux charges et trois pressions

⁴⁸ Les types de roue ne sont pas non plus disponibles, mais il est relativement facile de les déduire en fonction des axes des véhicules

Tableau 19 : Moyennes des ratios des déformations pour la charge - structure

	Structure 17 cm		Structure 10 cm	
	Roues simples	Roues jumelées	Roues simples	Roues jumelées
Mesures	1,20	1,27	1,05 (1,10) ⁴⁹	1,19
Modélisations	1,25	1,34	1,19	1,28

Tableau 20 : Moyennes des ratios des déformations pour la charge – structure et roues

	Structures		Roues	
	Structure 17 cm	Structure 10 cm	Roues simples	Roues jumelées
Mesures	1,23	1,12 (1,15)	1,12 (1,15)	1,23
Modélisations	1,30	1,23	1,23	1,31

Il a été souligné que le ratio des déformations pour la charge est toujours inférieur à celui de la charge. Selon les résultats moyens, une augmentation de 44 % de la charge conduit à une augmentation de 15 à 25 % des déformations pour des roues simples et de 20 à 30 % pour des roues jumelées. Avec une loi de puissance pour le calcul du trafic équivalent (cf. § 2.3.1), une charge de 11,5 to correspondrait à plus de 6 essieux de 8 to⁵⁰. En revanche, sur la base des ratios de charge des déformations longitudinales, un essieu de 11,5 to correspond à un nombre d'essieux de 8 to compris entre 2 (ratio de 1,15) et 4 (ratio de 1,30). Selon les résultats analysés ici, les lois de puissances utilisant le simple rapport des charges pour le calcul du trafic équivalent pénalisent les charges importantes. Par ailleurs, il n'est pas correct d'admettre une proportionnalité directe entre l'intensité des charges et les déformations qu'elles engendrent pour les méthodes mécaniques. Globalement, on peut observer que la variation relative des déformations correspond environ à la moitié de celle de la charge.

En admettant que les durées de vie se calculent à partir de loi de puissance basée sur les déformations, il est possible d'introduire ces résultats dans le calcul du trafic équivalent. Soit k_{ch} le ratio entre la variation relative de la charge et celle des déformations :

$$k_{ch} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_{réf}} = \frac{\Delta P}{P_{réf}} = \frac{P_i - P_{réf}}{P_{réf}} \quad \text{Eq. 16}$$

avec :

k_{ch} = ratio entre l'augmentation relative de la charge et l'augmentation relative des déformations (dans le cas présent, proche de 2)

$\Delta \varepsilon$ = variation entre la déformation obtenue pour une charge P_i et celle obtenue pour la charge $P_{réf}$

⁴⁹ Le résultat entre parenthèses ne tient pas compte des mesures effectuées à 30 °C sur la structure de 10 cm qui indiquaient une diminution des déformations avec l'augmentation de la charge

⁵⁰ $\left(\frac{11,5}{8}\right)^5 = 6,14$, alors que $(1,15)^5 = 2,01$ et $(1,30)^5 = 3,71$

- $\varepsilon_{\text{réf}}$ = déformation obtenue
 P_i = charge d'un essieu i
 $P_{\text{réf}}$ = charge de l'essieu standard de référence

On peut alors calculer le coefficient d'équivalence K_i de la façon suivante :

$$K_i = \left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{\text{réf}}}\right)^\alpha = \left(1 + \frac{P_i - P_{\text{réf}}}{k_{\text{ch}} \cdot P_{\text{réf}}}\right)^\alpha = \left(\frac{P_i + P_{\text{réf}} \cdot (k_{\text{ch}} - 1)}{k_{\text{ch}} \cdot P_{\text{réf}}}\right)^\alpha \quad \text{Eq. 17}$$

Pour que cette formule puisse être utilisée efficacement, il est nécessaire que la valeur de k_{ch} varie peu en fonction de la variation de la charge ou de la structure, ce qui est le cas pour les résultats de cette étude.

4.3 Pression de gonflage

Comme pour la charge, des valeurs moyennes sont calculées avec les résultats de toutes les températures et toutes les intensités (Tableau 21 et Tableau 22).

Tableau 21 : Moyennes des ratios des déformations pour la pression - structure

	Structure 17 cm		Structure 10 cm	
	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
Mesures	1,05	1,05	1,06	1,09
Modélisations	1,05	1,09	1,07	1,13

Tableau 22 : Moyennes des ratios des déformations pour la pression - roues

	Roues simples		Roues jumelées	
	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
Mesures	1,08	1,10	1,03	1,04
Modélisations	1,07	1,14	1,04	1,08

Compte tenu de lois de comportement admettant une puissance de 5, les ratios obtenus conduisent à des nombres de charges pouvant aller jusqu'à doubler. Même si ces variations ne doivent pas être négligées, il faut noter qu'elles demeurent peu importantes comparées à celles calculées à partir des variations de la charge. Cela confirme que la pression réelle des pneumatiques est sensiblement moins importante que l'intensité de la charge.

Si pour l'effet de la charge, les résultats n'étaient pas trop dépendant du type de roues, il n'en est pas de même ici. Sur la base des résultats de notre étude⁵¹, l'effet de la pression est nettement différencié selon le type de roue : on peut admettre des augmentations relatives des déformations de l'ordre du quart, respectivement de la

⁵¹ Particulièrement ceux des modélisations

moitié de l'augmentation relative de la pression selon que la charge est appliquée sur des roues jumelées ou simples.

La prise en compte de la pression dans le calcul du trafic équivalent peut se faire par l'intermédiaire d'un nouveau coefficient k_4 tenant compte de la pression dans la formule proposée par l'OCDE (cf. Eq. 5, page 11)⁵².

Selon une méthode similaire à ce qui a été fait pour la charge, on définit un facteur k_{pr} comme le ratio entre la variation relative de la pression et celle des déformations, pour une roue jumelée :

$$k_{pr} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_{réf}} = \frac{\Delta p}{p_{réf}} = \frac{p_{réelle} - p_{réf}}{p_{réf}} \quad \text{Eq. 18}$$

avec :

k_{pr} = ratio entre l'augmentation relative de la pression et l'augmentation relative des déformations pour une charge sur des roues jumelées (dans le cas présent égal à environ 4)

$\Delta \varepsilon$ = variation entre la déformation obtenue pour une pression $p_{réelle}$ et celle obtenue pour la pression $p_{réf}$

$\varepsilon_{réf}$ = déformation avec la pression de la charge de référence

$p_{réelle}$ = pression réelle de la charge

$p_{réf}$ = pression de la charge référence

En introduisant un coefficient k_r pour différencier les résultats selon le type de roues, le coefficient k_4 peut être calculé de la façon suivante :

$k_4 = 1 + \frac{k_r}{k_{pr}} \left(\frac{p_{réelle}}{p_{réf}} - 1 \right)$	Eq. 19
--	--------

où :

k_r = coefficient de roue (dans le cas présent égal à 2 pour roue simple et à 1 pour des roues jumelées)

Cette formule doit être prise avec beaucoup de précaution, notamment par le fait qu'elle ne tient pas compte de l'effet du type de structure relevé comme non négligeable sur l'effet de la pression (cf. Tableau 9 page 39 et Tableau 21 page 70) : l'effet de la pression est plus marqué sur les structures fines. D'autre part, comme pour la formule proposée pour tenir compte de l'intensité de la charge, il faudrait s'assurer que les coefficients k_{pr} et k_r demeurent relativement constants quelles que soient les conditions envisagées (variation de la pression et structure). De plus, il faut rappeler que les mesures et les modélisations utilisées pour arriver à cette

⁵² Les travaux de Eisenman, qui sont à la base de cette formule, proposaient déjà l'introduction d'un tel facteur de pression OCDE (1983). Effets des véhicules lourds de marchandises. Paris, Ed. OCDE: 181. et Eisenmann, J. (1975). "Dynamic wheel load fluctuations - road stress." Strasse und Autobahn 4.

proposition correspondent à des pressions dans l'ensemble plus faibles que les pressions réelles des pneus des véhicules lourds, généralement comprises entre 7 et 9 bars (Partanen and Panu 2001).

4.4 Type de roues

Comme précédemment, les valeurs moyennes doivent permettre de généraliser les observations à l'ensemble des résultats (Tableau 23 et Tableau 24).

Tableau 23 : Moyennes des ratios des déformations pour le type de roues

	Structure 17 cm		Structure 10 cm	
	11,5 to	8 to	11,5 to	8 to
Mesures	1,18	1,24	1,11	1,26
Calculs	1,14	1,22	1,12	1,20

Tableau 24 : Moyennes des ratios des déformations pour le type de roues

	Structures		Charge	
	Structure 17 cm	Structure 10 cm	11,5 to	8 to
Mesures	1,21	1,19	1,14	1,25
Calculs	1,18	1,16	1,13	1,21

La formule de l'OCDE (cf. Eq. 5, page 12) pour le calcul du trafic équivalent permet la prise en compte du type de roue par l'intermédiaire du coefficient k_2 , pour lequel une valeur de 1,20 est proposée. De façon générale, les résultats obtenus dans le cadre de ce travail confirment la validité de cette proposition. Il convient néanmoins de signaler que cette valeur tend à diminuer lorsque la charge augmente et est plus faible pour les structures peu épaisses.

5. Effets de la définition des conditions de charge

5.1 Contenu et démarche

De nombreux paramètres entrant dans l'application des charges de trafic (cf. § 2.3.2) ne correspondent pas à la modélisation standard définie au paragraphe 3.3. Afin de juger de l'influence relative de certains de ces paramètres, des modélisations avec le logiciel d'élément finis CAPA 3D (Scarpas 1998) de l'université de Delft (Pays-Bas) ont été réalisées pour une structure type en ne faisant varier que les conditions d'applications d'une charge définie en terme d'intensité, de pression de gonflage des pneus et de type de roue (Perret 2002). Le but est de définir l'effet sur les états de contraintes et de déformations des paramètres suivants :

- forme de l'empreinte : utilisation d'une surface rectangulaire à la place de la surface circulaire traditionnelle
- pression verticale moyenne utilisée : égale à la pression de gonflage des pneus ou calculée à partir de surfaces mesurées
- répartition non-uniforme de la pression verticale sur la surface de chargement
- introduction d'efforts transversaux.

Le cas de charge retenu est de 11,5 to appliqué sur des pneus simples gonflés à 8 bars, ce qui représente une forte surcharge pour ce genre de pneu et peut conduire à une répartition non uniforme des pressions verticales (cf. § 2.3.2.3).

La structure étudiée correspond à la section de référence - couche de base en HMT 22s - pour l'évaluation des enrobés à module élevé (cf. § 3.1). La température choisie est de 15°C. Les valeurs des modules ont été prises conformément à la méthode française (SETRA-LCPC 1994) et non selon les résultats des essais en laboratoire, ce qui signifie que les résultats absolus de ces calculs ne doivent pas être comparés avec ceux des mesures⁵³.

Les modélisations utilisent différentes répartitions de la charge, tant en ce qui concerne la forme de la surface d'application, que l'intensité et la distribution des pressions verticales. Des charges transversales ont également été appliquées. Les résultats ont également été comparés avec ceux obtenus à partir d'un modèle basé sur la théorie de Burmister utilisant la modélisation standard.

L'effet de ces différentes hypothèses retenues pour introduire une charge identique a été étudié au bas de la couche de base, puis à très faible profondeur. L'évaluation a porté essentiellement sur les contraintes et les déformations calculées selon les trois directions cartésiennes.

⁵³ Ce choix a initialement été fait afin que les conclusions puissent être admises indépendamment d'un cas particulier. Il s'avère en fin de compte que ce choix n'est pas réellement nécessaire

Le chapitre se conclut par quelques observations sur les modifications des états de contraintes et de déformations des matériaux bitumineux en fonction de la profondeur à laquelle ils se trouvent.

5.2 Hypothèses de modélisation

Compte tenu de la double symétrie que présente la situation étudiée, seul un quart de la structure a été modélisé : les dimensions pour les longueurs et les largeurs utilisées correspondent par conséquent à la moitié des valeurs réelles.

5.2.1 Genre d'éléments finis

Trois différents types d'éléments finis ont été utilisés :

- des éléments cubiques : dans la majeure partie des cas
- des éléments infinis : pour simuler des dimensions infinies pour les plans horizontaux
- des éléments d'interface : pour définir des conditions de friction variables entre les couches bitumineuses et la couche de fondation.

5.2.2 Maillage

A proximité de la charge, sur une surface de 300 mm par 300 mm, le maillage horizontal est composé de 400 éléments de 15 mm par 15 mm (20 divisions dans chaque direction horizontale). A l'extérieur de cette zone, la taille des éléments a été progressivement augmentée pour se terminer avec des éléments infinis. Verticalement, les dimensions des éléments ont aussi été progressivement augmentées avec la profondeur :

- couche de roulement : deux divisions de 15 mm
- couche de base : cinq divisions augmentant progressivement de 15 à 45 mm
- couche de fondation : trois divisions de respectivement 70, 120 et 210 mm
- sol de fondation : trois divisions de respectivement 300, 450 et 680 mm

Une image du maillage en trois dimensions de la structure est donnée sur la Figure 38.

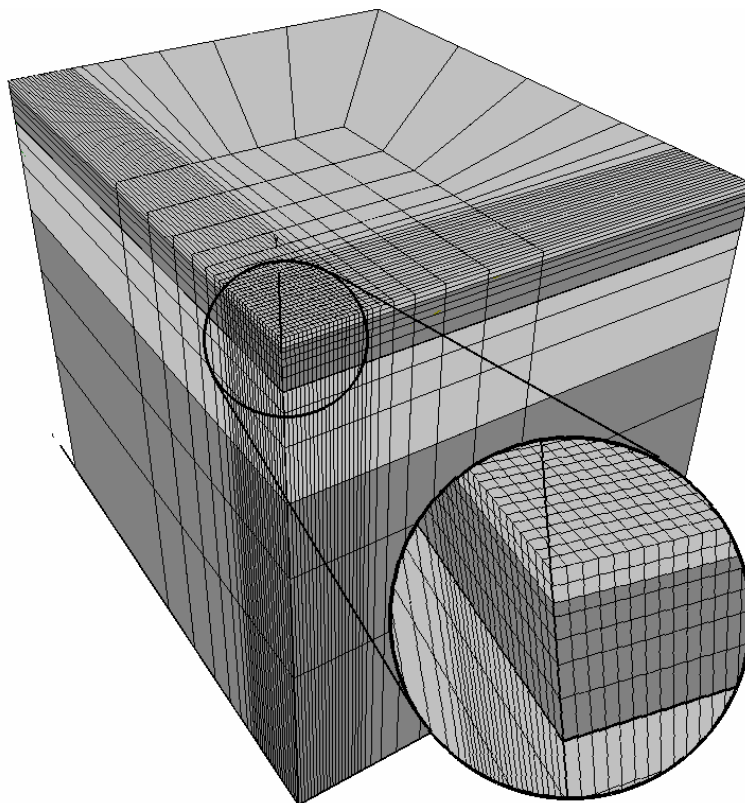


Figure 38 : Maillage en trois dimensions de la structure

5.2.3 Conditions aux limites

Les déplacements verticaux du plan horizontal situé au bas de la structure et les déplacements horizontaux des deux plans verticaux de symétrie ont été admis égaux à zéro. Les deux autres plans verticaux sont composés d'éléments infinis.

5.2.4 Conditions de charge

Deux hypothèses ont été utilisées pour la détermination de la surface de contact :

calcul en admettant une pression moyenne égale à celle de gonflage

directement à partir d'une mesure d'empreintes effectuées sur pneus utilisés à la halle-fosse (cf. Figure 5, page 14).

Ces hypothèses correspondent à des pressions moyennes de contact respectives de 8,00 et 9,27 bars. Les surfaces de contact sont rectangulaires. Elles ont une largeur constante de 135 mm et des longueurs respectives de 135 et 115 mm.

La répartition transversale des pressions verticales a été faite selon deux schémas :

- une pression uniformément répartie sur la surface de contact (Figure 39)
- appliquant des surpressions sur les bords du pneu (Figure 40).

La répartition non-uniforme des pressions verticales a été déterminée de façon théorique sur la base des méthodes proposées par Blab (cf. § 2.3.2.3). Les deux zones de surpressions dans les bords du pneu correspondent chacune au 20 % de sa largeur alors que la zone centrale est de 60 %. Le coefficient α de répartition de

charge a été admis égal à 1⁵⁴. A ces quatre cas de charges s'ajoute un cas de référence correspondant à la modélisation standard (cf. § 3.3).

Ces hypothèses sont récapitulées sur la Figure 39 et la Figure 40.

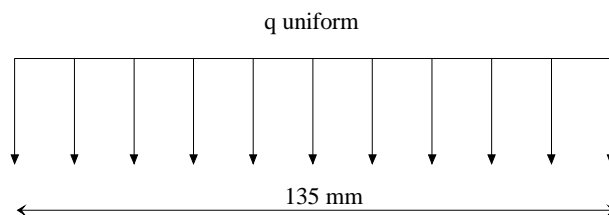


Figure 39 : Répartition uniforme de la pression verticale de chargement

et :

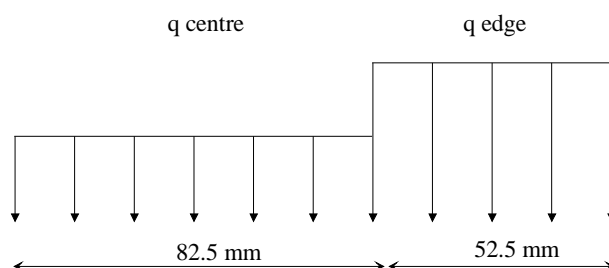


Figure 40 : Répartition non uniforme de la pression verticale de chargement

Les valeurs numériques correspondant à ces hypothèses sont récapitulées dans le Tableau 25.

Tableau 25 : Définition des cas de charge et valeurs des pressions verticales de chargement

	Description	q uniforme (bars)	q edge (bars)	q centre (bars)	longueur (mm)
Charge 1	Pression de gonflage non uniforme	-	10,30	6,55	135
Charge 2	Pression de gonflage uniforme	8,00	-	-	135
Charge 3	Pression de contact non uniforme	-	12,05	7,67	115
Charge 4	Pression de contact uniforme	9,27	-	-	115
Charge 5	Modélisation standard	8,00	-	-	circulaire

En plus de ces charges verticales, des composantes transversales ont été appliquées vers l'intérieur du pneu, ce qui correspond à la situation d'un pneu surchargé. Pour ces composantes, les efforts transversaux dus à la nature des gommes (cf. § 2.3.2.4) n'ont pas été pris en compte⁵⁵ et seule une répartition triangulaire sur l'ensemble de la largeur du pneu a été appliquée (Figure 41).

⁵⁴ Cette valeur de 1 signifie que l'intensité totale de la charge sur le centre de la roue est égale à la charge sur les deux bords

⁵⁵ Ces efforts n'agissent que très localement puisqu'ils sont rapidement équilibrés lors de leur diffusion dans la chaussée. Ils ne doivent être pris en compte que pour des études menées à une échelle plus réduite près de la surface de roulement

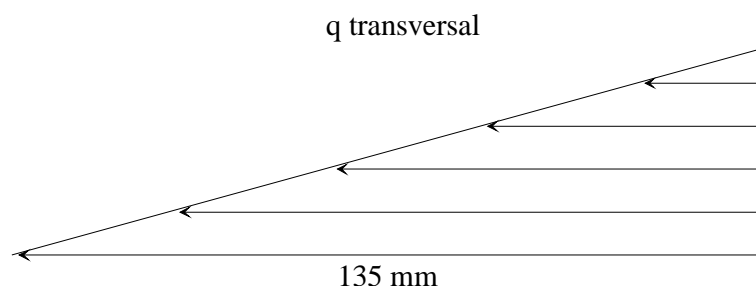


Figure 41 : Répartition transversale des charges transversales

Ce schéma de répartition est appliqué sur toute la longueur du pneumatique. L'intensité maximale de la pression transversale au bord du pneu est admise égale à la moitié de la pression verticale moyenne, soit 4 bars. Cette valeur est plus importante que celles qui pourraient être déduites des ratios tirés des mesures réelles (cf. § 2.3.2.4).

5.3 Evaluation au bas de la couche de base

L'ensemble des résultats et leur analyse détaillée ayant fait l'objet d'une publication (Perret 2002), seuls les principaux résultats sont synthétisés par l'intermédiaire des conclusions obtenues pour les variations des amplitudes maximales des contraintes et des déformations (Tableau 26).

Tableau 26 : Effets des conditions d'application de la charge sur les amplitudes maximales des contraintes et des déformations au bas de la couche de base

	Surface circulaire ou carrée	Pression de gonflage ou de contact	Distribution uniforme ou non de la pression	Charge transversale
Déformations longitudinales	Aucun effet	Augmentation de 9% avec pression réelle	Variation négligeable	Augmentation de 6%
Contraintes longitudinales	Aucun effet	Augmentation de 8% avec pression réelle	Variation négligeable	Augmentation de 6%
Déformations transversales	Aucun effet	Augmentation de 4% avec pression réelle	Réduction de 6% avec pression NU	Augmentation de 6%
Contraintes transversales	Aucun effet	Augmentation de 5% avec pression réelle	Réduction de 5% avec pression NU	Augmentation de 6%
Déformations verticales	Aucun effet	Augmentation de 6% avec pression réelle	Réduction de 4% avec pression NU	Augmentation de 6%
Contraintes verticales	Différence due au modèle	Augmentation de 3% avec pression réelle	Variation négligeable	Augmentation de 4%

Les variations maximales étant toujours inférieures à 10 %, on peut conclure que, pour des calculs au bas de la couche de base, ni la répartition des charges verticales ni les charges transversales n'influencent de façon déterminante les amplitudes maximales, tant en ce qui concerne les contraintes que les déformations.

La forme de la surface de chargement (circulaire ou carrée) n'a pas d'effet sur les résultats (les écarts relevés pour les contraintes verticales ne sont pas dues à la forme de la surface, mais à une situation particulière de répartition entre les contraintes horizontales et verticales). Pour un calcul au bas de la couche de base, une modélisation avec une surface circulaire est satisfaisante pour la détermination des amplitudes maximales.

Concernant les pressions moyennes utilisées, il semble préférable d'utiliser la pression réelle de contact, même si les variations sont peu importantes⁵⁶. Conformément à ce qui a déjà été observé (cf. § 3.5), les augmentations calculées sont de l'ordre de 5 à 10 % et sont donc toujours nettement inférieures à l'augmentation de la pression moyenne qui est ici d'environ 16 %.

Les variations dues à la pression sont différenciées selon la direction longitudinale ou transversale de calcul. Ceci s'explique par la forme rectangulaire de la surface de chargement utilisée lorsque la pression est déterminée à partir des mesures d'empreintes. Le taux d'augmentation plus important dans le sens longitudinal provient de la réduction de la longueur de la surface de chargement. Cela signifie que la direction selon laquelle les amplitudes maximales apparaissent peut dépendre du niveau de chargement. Ces valeurs maximales sont obtenues selon la direction dans laquelle l'empreinte du pneumatique est la plus courte. Par conséquent, des pneus dont les empreintes sont plus larges que longues induisent des sollicitations plus importantes longitudinalement que transversalement. Cette différence ne peut évidemment pas être obtenue à partir des modélisations basées sur une empreinte circulaire pour l'application de la charge. Rappelons toutefois que ces observations basées sur des calculs élastiques n'ont pas été vérifiées par les mesures, puisque les amplitudes maximales mesurées pour des roues simples étaient généralement identiques dans les deux directions.

La non uniformité de la distribution de la charge n'a que très peu d'influence et, dans les cas où une variation a été observée, les surpressions verticales dans les bords tendent à réduire les valeurs maximales obtenues. Pour les composantes transversales, l'effet des surpressions dans les bords tend à se compenser au centre du pneu entraînant ainsi une diminution logique des contraintes et des déformations en ce point. La réduction de la composante verticale des déformations est une conséquence de la diminution des contraintes transversales. A signaler encore que les amplitudes maximales demeurent au centre du pneu.

Bien que l'intensité choisie pour les efforts transversaux soit importante⁵⁷, ils n'engendrent qu'une faible augmentation de l'ensemble des contraintes et des déformations.

5.4 Evaluation en haut des couches bitumineuses

Pour les mêmes raisons que lors de l'analyse au bas de la couche de base, seuls les principaux résultats sont rappelés ici (Tableau 27).

⁵⁶ Il faut rappeler que ces résultats théoriques n'ont pas été totalement confirmés par les mesures in situ sur lesquelles la pression de gonflement n'a que peu d'effet

⁵⁷ Egale à la moitié de la pression verticale dans les bords

Tableau 27 : Effets des conditions d'application de la charge sur les amplitudes maximales des contraintes et des déformations en haut des couches bitumineuses

	Surface circulaire ou carrée	Pression de gonflage ou de contact	Distribution uniforme ou non de la pression	Charge transversale
Déformations longitudinales	Aucun effet	Augmentation de 8% avec pression réelle	Variation négligeable	Réduction de 3%
Contraintes longitudinales	Aucun effet	Augmentation de 10% avec pression réelle	Augmentation de 4% avec pression NU Maximum au bord	Augmentation de 5% Maximum au centre
Déformations transversales	Aucun effet	Augmentation de 4% avec pression réelle	Réduction de 6% avec pression NU	Augmentation de 60% Variation près des bords
Contraintes transversales	Aucun effet	Augmentation de 5% avec pression réelle	Augmentation de 4% avec pression NU Maximum au bord	Augmentation de 30% Variation près des bords
Déformations verticales	Aucun effet	Augmentation de 11% avec pression réelle	Aucun effet Effet sur les valeurs sous la charge	Augmentation de 60% Contraction dans les bords
Contraintes verticales	Aucun effet	Egales aux conditions de chargement	Egales aux conditions de chargement	Aucun effet

Comme au bas des couches, la répartition des charges verticales n'influencent que très peu les résultats des amplitudes maximales en haut des couches bitumineuses, tant en ce qui concerne les contraintes que les déformations. L'effet est logiquement plus marqué avec l'introduction d'efforts transversaux.

La forme de la surface de chargement (circulaire ou carrée) n'a pas d'effet sur les résultats maximaux. Elle n'a un effet que lorsqu'on s'éloigne du centre de la charge, dans les zones où les deux types de surfaces ne se superposent pas.

Concernant les pressions moyennes utilisées, il semble préférable d'utiliser la pression réelle de contact, même si les variations, quoique plus marquées qu'au bas des couches, restent peu importantes⁵⁸. Ici aussi, elles demeurent toujours inférieures à la variation de la pression. Les variations des contraintes et des déformations sont également différenciées selon la direction longitudinale ou transversale, ce qui s'explique de la même façon que pour le bas de la couche de base, c'est-à-dire par la réduction de la longueur de l'empreinte utilisée pour la modélisation.

Bien que la distribution non uniforme de la charge verticale n'ait que peu d'influence sur les amplitudes maximales, elle fait légèrement augmenter les contraintes horizontales et, surtout, les déplace dans les bords des pneus où les surpressions sont introduites. C'est la seule situation où les valeurs maximales de contraintes ou de déformations ne sont pas situées au centre du pneu. En revanche, on note une diminution des déformations transversales.

Si les efforts transversaux induisent naturellement une forte variation des contraintes et déformations dans cette direction, ils n'ont en revanche que peu d'influence sur les

⁵⁸ On ne dispose pas de mesures à une profondeur aussi faible. Toutefois, les mesures effectuées à 3 cm ne confirment pas ces observations, puisque les signaux expérimentaux de déformations ne varient que très peu avec la pression de gonflage des pneus (cf. § 3)

composantes longitudinales (on note néanmoins que les contraintes longitudinales maximales sont toujours obtenues au centre du pneu, même si la pression verticale n'est pas uniforme).

Pour les composantes transversales, l'augmentation signalée (cf. Tableau 27) concerne le centre du pneu, où tant les contraintes que les déformations sont en compression. En revanche, dans les bords des pneus, les charges transversales (résultats accompagnés d'un h) sont insuffisantes pour induire des tensions en surface, aussi bien en contraintes qu'en déformations (Figure 42).

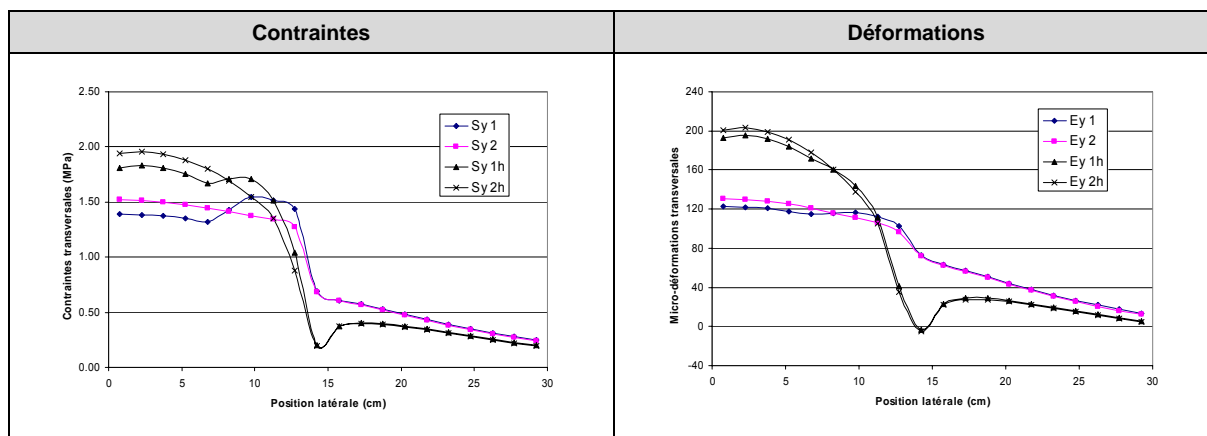


Figure 42 : Répartition transversale des contraintes et déformations transversales en haut des couches bitumineuses

Ces résultats sont en contradiction avec certaines études (Mante, Molenaar et al. 1995), (Groenendijk 1998), (Bensalem, Brown et al. 2000) qui signalent des tensions horizontales à proximité immédiate des bords des pneumatiques. Ils concluent généralement que ces tensions pourraient favoriser la fissuration par le haut observée dans de nombreuses situations. S'il est possible que des tractions ou des extensions apparaissent très localement juste à l'extérieur des pneus (que la modélisation relativement grossière dans cette zone n'aurait pas pu mettre en évidence), la forte intensité des compressions horizontales en surface dues aux seules charges verticales (de l'ordre de 15 bars au centre de la charge et de 7 bars juste à l'extérieur du pneu) oblige à conclure que si ces sollicitations existent réellement, elles doivent demeurer très localisées et présenter des intensités très faibles dont on peut douter qu'elles soient suffisantes pour expliquer l'initialisation de fissures à partir de la surface.

Enfin, quelles que soient les hypothèses de modélisations des charges, il faut souligner que les déformations verticales maximales calculées indiquent une extension des matériaux, ceci même sous la roue où les contraintes verticales sont en compression. A très faible profondeur, malgré les importantes charges verticales introduites par le pneu, les matériaux sont nettement plus comprimés horizontalement que verticalement avec pour conséquence (effet du coefficient de Poisson) que les déformations verticales sont des extensions (cf. § 3.7.4).

5.5 Variation des sollicitations en fonction de la profondeur

Les résultats présentés jusqu'ici ont permis de juger de l'influence de la modélisation des charges sur les contraintes et les déformations dans les couches bitumineuses d'une structure souple. Les résultats présentés se basent sur les contraintes et les

déformations définies selon des axes cartésiens. D'autres analyses, qui n'ont fait que confirmer les observations faites sur les composantes cartésiennes, ont été menées sur la base d'une décomposition des contraintes en axes principaux. Ces analyses - tant celles selon les axes cartésiens que celles selon les axes principaux - ont nettement mis en évidence des importantes variations du type des sollicitations des matériaux bitumineux selon la profondeur à laquelle ils sont situés dans la structure et selon leur position par rapport à la zone d'application de la charge.

La décomposition en axes principaux conduit à des résultats tridimensionnels qu'il est malaisé de représenter graphiquement en 3D. Par conséquent, il a été décidé de représenter les résultats par l'intermédiaire de diagramme p-q utilisant les notions de contrainte moyenne (p) et de déviateur (q). La valeur de p correspond à une pression hydrostatique moyenne exercée sur les matériaux alors que la composante q quantifie le cisaillement subi par les matériaux. Soit p_1 , p_2 et p_3 les trois contraintes principales, les valeurs de p et de q sont calculées de la façon suivante :

$p = \frac{1}{3}(p_1 + p_2 + p_3)$	Eq. 20
$q = \sqrt{\frac{1}{3}((p_1 - p_2)^2 + (p_1 - p_3)^2 + (p_2 - p_3)^2)}$	Eq. 21

Partant de cette décomposition, il est possible d'associer à chacun des points de calcul un couple de valeur p-q. Les diagrammes p-q représentent p en abscisse et q en ordonnée. Il est alors possible de visualiser le chemin des contraintes exercées sur un élément de matière lors du passage d'une charge. Ce chemin des contraintes décrit les couples p-q que les matériaux situés en un point donné de la structure sont appelés à subir au passage d'une charge, permettant de visualiser la répartition entre la pression hydrostatique et le cisaillement.

Les résultats présentés correspondent aux valeurs p et q de points sis dans le plan longitudinal vertical passant par le centre de la charge. Afin de représenter l'évolution temporelle des valeurs p-q lors du déplacement de la charge, les valeurs p-q ont été calculées sur une distance de 30 cm à partir du milieu de la charge. Ces représentations ne variant pas sensiblement pour les différents modes d'introduction de la charge étudiés, les diagrammes p-q du cas de charge 2 (cf. Tableau 25) sont présentés pour six profondeurs différentes séparées d'environ 30 mm (Figure 43).

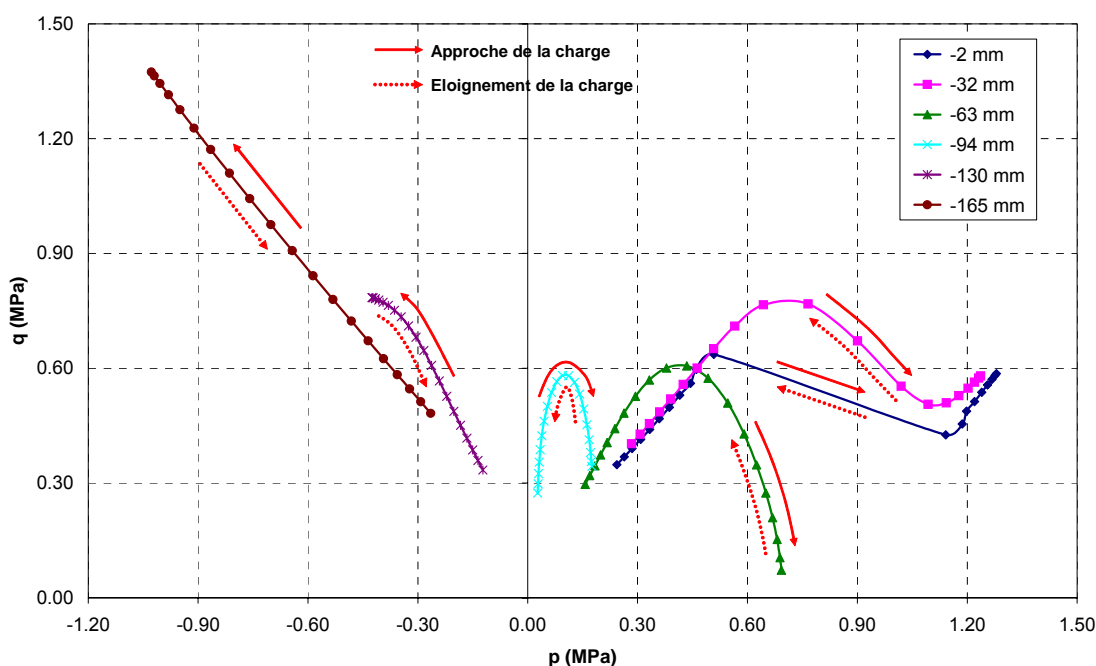


Figure 43 : Chemin des contraintes à différentes profondeurs dans les couches bitumineuses, situation théorique à 15°C

Pour des calculs élastiques linéaires, le chemin des contraintes est identique avant et après le passage de la charge. À l'approche de la charge, les états de contrainte p - q d'un point donné se modifient selon les flèches continues sur la Figure 43. Lorsque la charge s'éloigne, les courbes sont parcourues en sens inverse selon les flèches pointillées. Ces chemins des contraintes diffèrent fortement selon la profondeur à laquelle les calculs sont effectués. Cela signifie que les matériaux bitumineux subissent des cycles de sollicitations très variables selon la profondeur à laquelle ils se situent dans la chaussée. Il est raisonnable de penser que ces différents cycles de sollicitations conduisent à des modes de dégradation différents.

Si on adopte un critère de rupture du type Mohr-Coulomb, la situation la plus critique se situe au bas des couches (165 mm) où les matériaux subissent une valeur hydrostatique en traction couplée avec un important niveau de cisaillement. Ceci confirme l'utilité d'un critère de dimensionnement situé au bas de la couche de base et est en accord avec la limitation des déformations horizontales retenue par la majorité des méthodes mécaniques de dimensionnement. On note par ailleurs que le chemin des contraintes à une profondeur de 130 mm (chemin violet sur la Figure 43) est très voisin de celui au bas de la couche de base. Aux profondeurs de 63 et 94 mm, il est logique, compte tenu de la proximité de l'axe neutre, que la matière subisse des sollicitations peu importantes.

Concernant les chemins de contraintes à faible profondeur, on observe des formes plus inattendues avec des passages par des valeurs maximales et minimales de cisaillement. Mathématiquement, cette situation s'explique par la brusque introduction d'une composante p_3 dans les calculs de p et de q , composante due à l'application de la composante verticale du chargement. Ces formes inattendues ont donc la même origine que les « irrégularités » observées sur les signaux au bas de la couche de roulement étudiés au paragraphe 3.7. La courbe à très faible profondeur

(2 mm) présente un brusque saut dans les valeurs de p . Les valeurs de part et d'autre de ce saut correspondent au dernier et au premier point de calcul, situés respectivement à l'extérieur et à l'intérieur de la charge verticale. Il est quasiment certain qu'une densification des points de calcul dans cette zone conduirait à une forme similaire à celle obtenue à 32 mm, mais avec une composante de cisaillement supérieure.

Ces différences de sollicitations entre le haut et le bas des couches méritent d'être illustrées par une visualisation des deux situations extrêmes que sont les états de contraintes et de déformations au sommet et au bas des couches bitumineuses (Figure 44).

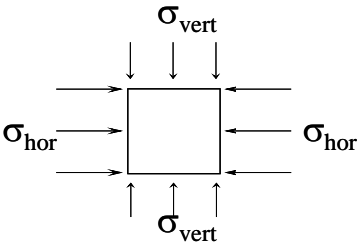
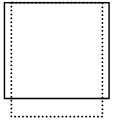
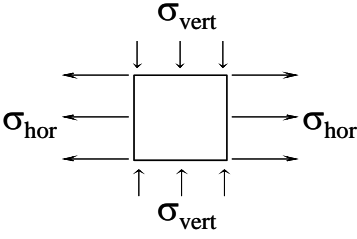

	Contraintes	Déformations
A faible profondeur		<p>avec $\sigma_{hor} \gg \sigma_{vert}$</p> 
Au bas des couches		

Figure 44 : Contraintes et déformations d'éléments de matériaux bitumineux situés à différentes profondeurs au droit de la charge

A proximité de la surface, les matériaux sont fortement comprimés dans toutes les directions. Les contraintes horizontales sont nettement supérieures à la contrainte verticale, cette dernière étant voisine de la pression de contact entre le pneu et la surface. Pour les déformations, cette situation conduit aux extensions verticales déjà signalées. Un élément de matériau à faible profondeur est ainsi contracté horizontalement et subi une extension verticale. La situation est différente au bas des couches bitumineuses, où les matériaux subissent des fortes tractions dans le plan horizontal et une compression verticalement. Du point de vue des déformations, cela conduit à une situation dans laquelle les matériaux sont en extension horizontalement et en contraction verticalement.

Ces observations permettent de confirmer que les exigences pour la composition des mélanges bitumineux doivent être adaptées selon la profondeur à laquelle les matériaux sont utilisés. Au sommet de la couche de roulement, où les efforts sont en compression, la qualité des composants granulaires est capitale. En revanche, la situation est différente au bas de la couche bitumineuse où les matériaux bitumineux sont appelés à subir des tractions et des extensions pour lesquelles la qualité du liant est capitale.

5.6 Synthèse

Les contraintes et les déformations au bas de la couche de base ne sont que peu affectées par les hypothèses d'application de la charge. En effet, les écarts les plus importants restent inférieurs à 10 %. Ces écarts résultent essentiellement du choix de la valeur retenue pour la pression de contact. Il convient d'utiliser la pression réelle de contact pour les modélisations, même si cette donnée est difficile à obtenir. Les efforts horizontaux induisent une augmentation générale des contraintes et des déformations au bas de la couche de base de l'ordre de 6 % pour le cas étudié.

Concernant les contraintes et les déformations en surface, la variation des conditions d'application des charges verticales n'a que peu d'effet puisque les écarts les plus importants sont d'environ 10 %. En revanche, les efforts transversaux affectent plus les résultats, mais restent insuffisants pour induire des tractions en surface.

Si les conditions d'application des charges n'influencent pas beaucoup les intensités des sollicitations dans les couches bitumineuses, on retiendra de cette étude que l'état de sollicitations des matériaux bitumineux dépend en revanche fortement de la profondeur à laquelle ils se situent. Ces variations devraient être intégrées tant dans le cadre des essais en laboratoire que pour la formulation des mélanges bitumineux.

6. Conclusions et recommandations

Une des clés du comportement des chaussées routières souples est sans aucun doute la compréhension de la variation de l'état de contrainte et de déformation y régnant durant le passage d'une charge de trafic. La détermination de ces sollicitations peut se réaliser selon deux méthodes à utiliser de façon complémentaire : des mesures expérimentales et des modélisations. Même si les progrès enregistrés dans le développement des outils informatiques et dans la connaissance des lois de comportement des matériaux laissent entrevoir des possibilités importantes pour des démarches théoriques, les données expérimentales doivent cependant continuer à jouer un indispensable rôle de validation pour ces approches.

L'analyse comparative des résultats des mesures et de ceux tirés de modélisations, réalisées conformément aux recommandations d'une méthode mécanique empirique de dimensionnement, a permis de déterminer les influences relatives de trois des principaux paramètres définissant les charges de trafic et de la température. Il a été montré que les modélisations permettent une évaluation satisfaisante de l'effet de la plupart de ces paramètres. Des propositions pour la prise en compte de ces paramètres dans la détermination du trafic équivalent ont pu être émises. Elles se basent tant sur les résultats expérimentaux que théoriques.

Par ailleurs, cette analyse comparative a montré que l'adéquation entre les valeurs mesurées et modélisées à partir d'un modèle simple – comportement élastique linéaire selon les recommandations de la méthode française de dimensionnement des chaussées souples – est très bonne pour des températures jusqu'à 15°C. Les résultats sont moins concluants à 30°C, notamment en raison du comportement visqueux des matériaux bitumineux.

Il ressort des analyses des effets des conditions de charge que les pressions de gonflage des pneus ne sont pas déterminantes pour les calculs des déformations horizontales dans les couches bitumineuses des chaussées souples relativement épaisses. Ceci s'explique en grande partie par un comportement global de ces couches qui peut être assimilé à celui des dalles. Cette faible importance relative de la pression est essentiellement valable pour des couches bitumineuses relativement épaisses, la pression ayant certainement un rôle plus marqué pour des structures minces.

Cette similitude de comportement avec les dalles se traduit notamment par une situation à priori paradoxale concernant les contraintes agissant à faible profondeur, à savoir que les composantes horizontales y sont parfois sensiblement supérieures aux verticales. Les premières dépendent essentiellement de l'intensité de la charge et de la rigidité de la structure alors que les secondes ne dépendent que de la pression de contact entre les pneus et la chaussée. Cet état particulier de contrainte a été mis en évidence par l'explication d'« irrégularités » observées sur des signaux de déformations horizontales mesurés à faible profondeur, ce qui souligne une nouvelle fois l'utilité des données expérimentales. Ces « irrégularités » apparaissent aux extrémités de la charge, soit à l'endroit où les contraintes verticales subissent une brusque et importante variation. Cette position est révélatrice de la zone dans laquelle les efforts de recherche doivent être menés, c'est-à-dire au bord de la zone de charge et à faible profondeur. Les importants efforts de cisaillement agissant à cet

endroit ont déjà été soulignés par de nombreux chercheurs et ont une origine similaire à celle du poinçonnement des dalles.

La mise en évidence, par la mesure et le calcul, de sollicitations importantes à faible profondeur explique certainement la dégradation par fissuration de surface des couches bitumineuses constatée sur bon nombre de chaussées. La détermination classique de la déformation au bas du revêtement doit désormais se compléter par une estimation de l'état de sollicitation à faible profondeur. Il est recommandé de retenir des matériaux particulièrement performants en fatigue et déformation permanente à des profondeurs de 3 à 7 cm.

Finalement les méthodes de dimensionnement empiriques des chaussées (méthode VSS) devront progressivement être remplacées par des méthodes faisant appel à une approche analytique (méthode mécanique empirique). Il sera alors possible d'intégrer les caractéristiques détaillées des charges et d'en déduire l'état de sollicitation à faible profondeur et sous le bord du pneu.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude devraient faire l'objet de recherches complémentaires dans diverses directions. Premièrement, les efforts concernant la précision des mesures expérimentales doivent être poursuivis et les types de mesures être diversifiés. Il est souhaitable de pouvoir disposer de plus de mesures de l'état de sollicitation à proximité des charges. Deuxièmement, un lien devrait être trouvé entre les résultats par les mesures in situ et les paramètres des essais en laboratoire. Enfin, il serait intéressant d'introduire des variations statistiques des nombreux paramètres intervenant dans la modélisation des chaussées, notamment en ce qui concerne l'épaisseur réelle des couches et la répartition de la température dans ces couches.

7. Bibliographie

- [1] AASTHO (1986). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington D. C., 1986.
- [4] Balay, J.-M. (1998). AlizéWin. Logiciel de calcul. Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Nantes (F).
- [5] Bensalem, A., Brown, A. J., Nunn, M. E. and Merril, D. (2000). Finite element modeling of fully flexible pavements; surface cracking and wheel interaction. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp.103-122.
- [6] Blab, R. (1999). Introducing Improved Loading Assumptions into Analytical Pavement Models Based on Measured Contact Stresses of Tires. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno NV.
- [7] Blab, R. and Tarvey, J. T. (2000). Modeling measured 3D tire contact stresses in a viscoelastic FE pavement model. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp.123-148.
- [8] Brown, S. F. (1973). Determination of Young's Modulus for Bituminous Materials in Pavement Design in Highway Research Record 431(Highway Research Board): pp. 38-49.
- [9] Cebon, D. (1999). Handbook of Vehicle-Road Interaction. Lisse, Ed. Swets & Zeitlinger.
- [10] COST_323 (1998). Pesage en marche des véhicules routiers: 2ème conférence européenne Lisbonne - Actes finaux. Luxembourg, European Commission, 1998.
- [11] COST_333 (1999). Final report of Cost Action 333: Development of New Bituminous Pavement Design Method. Luxembourg, European Commission, 1999.
- [12] De Beer, M., Fisher, C. and Jooste, F. (1997). Determination of pneumatic tyre/pavement contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 179-227.
- [13] Dumont, A.-G. et Scazziga, I. (1985). Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées. Berne, Office fédéral des routes (OFROU), Rapport n° 104, 1985.
- [14] Eckmann, B. (1997). New Tools for Rational Pavement Design. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 25-42.
- [15] Eisenmann, J. (1975). Dynamic wheel load fluctuations - road stress in Strasse und Autobahn 4.
- [16] Ekdahl, P. (1998). Analysis of the stresses and strains collected in COST 333 (Swiss contribution) through a short term scientific mission, LAVOC - EPFL, Rapport, octobre 1998.

- [17] Francken, L. (1979). Fatigue d'un enrobé bitumineux soumis à des conditions de sollicitations réalistes in La technique routière.
- [18] Francken, L. (1997). PRADO. Logiciel de calcul. Centre de recherches routières (CRR), Bruxelles (B).
- [19] Groenendijk, J. (1998). Accelerated testing and surface cracking of asphaltic concrete pavements. Thèse de doctorat, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft (NL).
- [20] Groenendijk, J. (1999). Relative Pavement Wear Ratios of Wide Base Single and Dual Truck Tyres: a Literature Survey. Delft (NL), Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW), Rapport, août 1999.
- [21] Huang, Y. H. (1993). Pavement Analysis and Design. Englewoodcliffs, Ed. Prentice Hall.
- [22] Huhtala, M., Pihlajmäki, J. and Halonen, P. (1997). Pavements Response due to Dynamic Axle Loads. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 471-485.
- [23] Kim, H. B. and Buch, N. (2003). Reliability-Based Pavement Design Model accounting for Inherent Variability of Design Parameters. 82nd Transport Research Board Annual Meeting, Washington D. C.
- [24] Mante, B. R., Molenaar, A. A. A. and Groenendijk, J. (1995). Stresses and Strains in Pavements. Delft (NL), Technical University of Delft, Rapport n° 7-95-209-32M, mars 1995.
- [25] Morgenthaler, S. (1997). Introduction à la statistique. Méthodes mathématiques pour l'ingénieur. Lausanne, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR).
- [26] NF_P98-260-2 Essais relatifs aux chaussées - Mesure des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés - Partie 2 : détermination du module complexe par flexion sinusoïdale. Norme française, AFNOR, 1992.
- [27] OCDE (1983). Effets des véhicules lourds de marchandises. Paris, Ed. OCDE, Rapport, décembre 1982.
- [28] OCDE (1985). Essais en vraie grandeur des superstructures routières. Paris, Ed. OCDE, Rapport, 1985.
- [29] OCDE (1991). Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières. Paris, Ed. OCDE, Rapport, 1991.
- [30] Partanen, L. and Panu, S. (2001). Tyre Pressure on Trucks. Helsinki, Finnra, 27, 2001.
- [31] Perret, J. (2002). The Effect of Loading Conditions on Pavement Responses calculated using a Linear-Elastic model. 3rd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Amsterdam, pp. 283-303.
- [32] Perret, J., Dumont, A.-G., Turtshy, J.-C. et Ould-Henia, M. (2001). Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: 1ère partie: Enrobés à haut module, OFROU (Office fédéral des routes), 1000, décembre 2001.

- [33] Perret, J. (2003). Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic. Thèse de doctorat n°2786, Département de génie civil, EPFL, Lausanne.
- [34] Scarpas, A. (1998). CAPA 3D User's manual, parts I, II and III. Programme d'éléments finis. Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft (NL).
- [35] Schimmerling, P., Sisson, J.-C. and Zaïdi, A. (1998). Pratique des plans d'expériences. Paris, Lavoisier TEC&DOC.
- [36] SETRA-LCPC (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique, Laboratoire central des ponts et chaussées - Service d'études techniques des routes et autoroutes, Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme (F).
- [37] SN 640320 Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent. Norme suisse, VSS, 2000.
- [38] SN 640324 Dimensionnement - Superstructure des routes. Norme suisse, VSS, 1997.
- [39] SN 640431 Revêtements en béton bitumineux - conception, exigences, exécution. Norme suisse, VSS, 1997.
- [40] SN 640435 Couches de roulement en enrobé macro rugueux - conception, exécution. Norme suisse, VSS, 1994.
- [41] SN 670120 Graves pour couches de fondation - Exigences de qualité. Norme suisse, VSS, 1999.
- [42] SN 670316 Sols, essais - pénétromètre CBR, essai in situ. Norme suisse, VSS, 1994.
- [43] SN 670317 Sols, essais - essai de plaque ME et Ev. Norme suisse, VSS, 1998.
- [44] SN 670319 Sols, essais - essai de plaque selon Westergaard. Norme suisse, VSS, 1992.
- [45] SN 670320 Sols, essais - essais CBR en laboratoire. Norme suisse, VSS, 1994.
- [46] Sweere, G. T. H. (1990). Unbound granular bases for roads. Thèse de doctorat, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft.
- [47] Turtshy, J.-C. and Perret, J. (1999). Swiss Contribution to COST 333 - Full-Scale Accelerated Loading Test (ALT) at the Halle-Fosse, LAVOC-EPFL, Rapport, avril 1999.
- [48] Van Cauwelaert, F. (1995). Stresses and displacements in multi-layered orthotropic systems - Theoretical background to the stress/strain calculation program used within the NOAH software.
- [49] Viagroup (1998). Mesures de modules et contraintes sur Champs 2, 3, 5 et 6, Bilan structurel avec le FWD, LAVOC - EPFL, Rapport, février 1998.
- [50] Yap, P. (1989). Truck Tire Types and Road Contact Pressures. Second International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Kelowna.

8. Annexes

8.1 Equations des contraintes et déplacements du système de Burmister

Ces équations sont obtenues à partir de la fonction de contraintes :

$$\phi_i = pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{mz} - zD_i e^{-mz}] dm$$

à partir de laquelle on tire les résultats suivants pour les contraintes et les déplacements.

Contraintes normales :

$$\sigma_z = pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} - C_i m(1 - 2\nu_i + mz)e^{mz} + D_i m(1 - 2\nu_i - mz)e^{-mz}] dm$$

$$\begin{aligned} \sigma_r = & -pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 - 2\nu_i + mz)e^{mz} - D_i m(1 - 2\nu_i - mz)e^{-mz}] dm \\ & + pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}] dm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} = & -pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [C_i m e^{mz} - D_i m e^{-mz}] 2\nu_i dm \\ & - pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}] dm \end{aligned}$$

Contraintes tangentielles :

$$\tau_{rz} = -pa \int_0^{\infty} J_1(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(2\nu_i + mz)e^{mz} + D_i m(2\nu_i - mz)e^{-mz}] dm$$

Déplacements :

$$\begin{aligned} w = & \frac{1 + \nu_i}{E_i} pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} + zC_i m(2 - 4\nu_i - mz)e^{mz} - zD_i m(2 - 4\nu_i - mz)e^{-mz}] dm \\ u = & -\frac{1 + \nu_i}{E_i} pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}] dm \end{aligned}$$

avec :

- a : rayon de la surface circulaire de chargement
- p : pression de chargement (uniformément répartie)
- r : distance radiale en coordonnées cylindriques
- z : profondeur
- σ_z : contrainte verticale
- σ_r : contrainte radiale

σ_θ :	contrainte circonférentielle
τ_z :	contrainte verticale de cisaillement
w :	déplacement vertical
u :	déplacement radial
E_i :	module de Young de la i ème couche
ν_i :	coefficient de poisson de la i ème couche
A_i, B_i, C_i, D_i :	paramètres inconnus, déterminés par les conditions aux limites
J_0 :	fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0
J_1 :	fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1
m :	paramètre d'intégration

8.2 Essais de module en laboratoire pour les matériaux bitumineux

Couche de roulement en MR 11

LAVOC-EPFL
1015 LAUSANNE
TEL (021) 6932345

COURBE MAITRESSE DU MODULE E* - REFERENCE 10 °C MR 11 AU LIANT COLFLEX N 55

MANDANT : COST 333
TYPE D'ENROBE : COUCHE DE ROULEMENT AU LIANT COLFLEX N 55 (enrobé réchauffé)
DATE DE FABRICATION : 19.09.97
DATE DU SCIAGE : AOUT 1998
DATE DE L'ESSAI : SEPTEMBRE 1998
OPERATEUR(S) : M.PITTET

CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C] : -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
FREQUENCE [Hz] : 8, 15, 25, 33, 50
EPSILON THEORIQUE [1E-6] : 40

CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX

TENEUR EN LIANT / E [%] : 5.83
TENEUR EN VIDES MOY. GEOM. [%] : 5.4 (HYDRO. 4.4)
DELTA H MOYEN [Kcal/mole] : 40.87

MODULE E* INTERPOLE A 10 °C / 10 Hz : **12504 MPa**

MODULE E* INTERPOLE A 15 °C / 10 Hz : **9358 MPa**

MODULE E* - RESULTATS D'ESSAI

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
-10	8	21837	1998
	15	22538	3747
	25	23145	6245
	33	23473	8243
	50	24603	12489
-5	8	19582	465
	15	20630	872
	25	21327	1454
	33	21663	1919
	50	23266	2908
0	8	17468	114
	15	18316	214
	25	19244	357
	33	19790	471
	50	21441	714
5	8	14728	30
	15	15809	55
	25	16750	92
	33	17312	122
	50	19459	185
10	8	12035	8
	15	13212	15
	25	14172	25
	33	14734	33
	50	16375	50
15	8	8800	2.27
	15	10042	4.25
	25	10809	7.09
	33	11584	9.36
	50	12607	14.18

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
20	8	6629	0.67
	15	7693	1.26
	25	8604	2.10
	33	9077	2.77
	50	10247	4.20
25	8	4438	0.21
	15	5416	0.39
	25	6184	0.65
	33	6634	0.85
	50	7506	1.29
30	8	2733	0.066
	15	3415	0.124
	25	4036	0.207
	33	4351	0.274
	50	4886	0.415
35	8	-	-
	15	-	-
	25	-	-
	33	-	-
	50	-	-
40	8	-	-
	15	-	-
	25	-	-
	33	-	-
	50	-	-
45	8	-	-
	15	-	-
	25	-	-
	33	-	-
	50	-	-

Couche de base en HMT 22s

LAVOC-EPFL
1015 LAUSANNE
TEL (021) 6932345

**COURBE MAITRESSE DU MODULE E* - REFERENCE 10 °C (-10 / 45 °C)
HMT 22S AU LIANT B 80/100**

MANDANT : OFR 20/96 - ENROBES A MODULE ELEVE
TYPE D'ENROBE : HMT 22S AU LIANT B 80/100, ECHANTILLONS PRELEVES IN SITU
DATE DE FABRICATION : SEPTEMBRE 1997
DATE DU SCIAGE : NOVEMBRE 1999
DATE DE L'ESSAI : DECEMBRE 1999
OPERATEUR (S) : M.PITTET

CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C] : -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45
FREQUENCE [Hz] : 8, 15, 25, 33, 50
EPSILON THEORIQUE [1E-6] : 40

CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX

TENEUR EN LIANT / E MESUREE [%] : 4.13
TENEUR EN VIDES MOY.HYDRO. [%] : 6.6
DELTA H MOYEN [Kcal/mole] : 50.57

MODULE E* INTERPOLE A 10 °C / 10 Hz : **10'184 MPa**

MODULE E* INTERPOLE A 15 °C / 10 Hz : **7'524 MPa**

MODULE E* - RESULTATS D'ESSAI

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]	TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
-10	8	18883	7403	20	8	5108	0.37
	15	19559	13880		15	5940	0.70
	25	20604	23133		25	6634	1.17
	33	20569	30536		33	7013	1.54
	50	21263	46267		50	7584	2.33
-5	8	16767	1220	25	8	3492	0.09
	15	17593	2287		15	4183	0.16
	25	18316	3812		25	4848	0.27
	33	18797	5032		33	5124	0.36
	50	18991	7625		50	5956	0.54
0	8	14620	215	30	8	2259	0.021
	15	15358	403		15	2842	0.040
	25	16168	671		25	3326	0.067
	33	16450	886		33	3656	0.088
	50	16972	1342		50	4198	0.133
5	8	12387	40	35	8	1387	0.0055
	15	13121	75		15	1710	0.0102
	25	13760	126		25	2116	0.0170
	33	14034	166		33	2332	0.0225
	50	14817	252		50	2856	0.0341
10	8	9799	8	40	8	800	0.0015
	15	10760	15		15	1054	0.0027
	25	11352	25		25	1312	0.0046
	33	11697	33		33	1440	0.0060
	50	12884	50		50	1785	0.0091
15	8	7107	1.68	45	8	442	0.00041
	15	7927	3.15		15	609	0.00076
	25	8657	5.26		25	750	0.00127
	33	9020	6.94		33	841	0.00168
	50	9672	10.51		50	1038	0.00254

Couche de base en EME1

LAVOC-EPFL
1015 LAUSANNE
TEL (021) 6932345

COURBE MAITRESSE DU MODULE E* - REFERENCE 10 °C (-10 / 45 °C) EME 1 AU LIANT BP STRUCTUR, VIDES ELEVES

MANDANT : OFR 20/96 - ENROBES A MODULE ELEVE
TYPE D'ENROBE : EME 1 AU LIANT BP STRUCTUR, VIDES ELEVES, ECHANTILLONS PRELEVES IN SITU
DATE DE FABRICATION : SEPTEMBRE 1997
DATE DU SCIAGE : NOVEMBRE 1999
DATE DE L'ESSAI : JANVIER 2000
OPERATEUR (S) : M.PITTET

CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C] : -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45
FREQUENCE [Hz] : 8, 15, 25, 33, 50
EPSILON THEORIQUE [1E-6] : 40

CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX

TENEUR EN LIANT / E MESUREE [%] : 4.25
TENEUR EN VIDES MOY.HYDRO. [%] : 6.9
DELTA H MOYEN [Kcal/mole] : 47.48

MODULE E* INTERPOLE A 10 °C / 10 Hz : **16'885 MPa**
MODULE E* INTERPOLE A 15 °C / 10 Hz : **13'588 MPa**

MODULE E* - RESULTATS D'ESSAI

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]	TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
-10	8	23865	4882	20	8	10772	0.45
	15	24707	9153		15	11852	0.84
	25	25258	15256		25	12544	1.41
	33	25843	20137		33	13063	1.85
	50	26671	30511		50	13900	2.81
-5	8	22494	898	25	8	8487	0.11
	15	23264	1684		15	9300	0.21
	25	23892	2806		25	10227	0.36
	33	24097	3704		33	10519	0.47
	50	24848	5612		50	11994	0.72
0	8	20692	176	30	8	6361	0.031
	15	21723	329		15	7262	0.057
	25	22427	549		25	7917	0.095
	33	22548	725		33	8310	0.126
	50	23982	1098		50	9436	0.191
5	8	18598	36	35	8	4353	0.0085
	15	19647	68		15	5049	0.0159
	25	20346	114		25	5798	0.0266
	33	20542	150		33	6230	0.0351
	50	21515	228		50	7456	0.0532
10	8	16449	8	40	8	2885	0.0025
	15	17299	15		15	3533	0.0046
	25	17884	25		25	4088	0.0077
	33	18428	33		33	4487	0.0102
	50	18847	50		50	5276	0.0154
15	8	13108	1.85	45	8	1804	0.00074
	15	14159	3.47		15	2233	0.00139
	25	14971	5.78		25	2734	0.00232
	33	15350	7.63		33	3004	0.00307
	50	16440	11.56		50	3728	0.00465

Couche de base en EME2

LAVOC-EPFL
1015 LAUSANNE
TEL (021) 6932345

COURBE MAITRESSE DU MODULE E* - REFERENCE 10 °C (-10 / 45 °C) EME 2 AU LIANT MIXELF 10/20, VIDES ELEVES

MANDANT : OFR 20/96 - ENROBES A MODULE ELEVE
TYPE D'ENROBE : EME 2 AU LIANT MIXELF 10/20, VIDES ELEVES, ECHANTILLONS PRELEVES IN SITU
DATE DE FABRICATION : SEPTEMBRE 1997
DATE DU SCIAGE : NOVEMBRE 1999
DATE DE L'ESSAI : JANVIER 2000
OPERATEUR (S) : M.PITTET

CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C] : -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45
FREQUENCE [Hz] : 8, 15, 25, 33, 50
EPSILON THEORIQUE [1E-6] : 40

CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX

TENEUR EN LIANT / E MESUREE [%] : 5.7
TENEUR EN VIDES MOY.HYDRO. [%] : 5.5
DELTA H MOYEN [Kcal/mole] : 49.34

MODULE E* INTERPOLE A 10 °C / 10 Hz : **17'137 MPa**

MODULE E* INTERPOLE A 15 °C / 10 Hz : **14'082 MPa**

MODULE E* - RESULTATS D'ESSAI

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]	TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
-10	8	25464	6272	20	8	10735	0.40
	15	25958	11759		15	11816	0.75
	25	25944	19599		25	12643	1.26
	33	26448	25870		33	13163	1.66
	50	26748	39198		50	14427	2.51
-5	8	23837	1080	25	8	8179	0.10
	15	24143	2025		15	9293	0.18
	25	24906	3374		25	10085	0.30
	33	25103	4454		33	10502	0.40
	50	26360	6749		50	11782	0.61
0	8	21883	198	30	8	5895	0.025
	15	22392	372		15	6797	0.046
	25	22975	620		25	7650	0.077
	33	23517	818		33	8101	0.101
	50	23989	1239		50	9242	0.154
5	8	19527	39	35	8	3745	0.0065
	15	20349	73		15	4550	0.0122
	25	20634	121		25	5401	0.0203
	33	21235	160		33	5762	0.0269
	50	22134	242		50	6765	0.0407
10	8	16756	8	40	8	2258	0.0018
	15	17548	15		15	2921	0.0034
	25	18358	25		25	3560	0.0056
	33	18864	33		33	3933	0.0074
	50	19665	50		50	4828	0.0112
15	8	13730	1.75	45	8	1258	0.00052
	15	14547	3.28		15	1690	0.00097
	25	15304	5.46		25	2176	0.00162
	33	15795	7.21		33	2460	0.00213
	50	16817	10.92		50	3123	0.00323